



### 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/10985/7637>

#### To cite this version :

Lounès ILLOUL, Laurent BERTHE, Philippe LORONG, Nicolas RANC, Matthieu SCHNEIDER, Véronique FAVIER, Jeremie GIRARDOT - Procédé de perçage par laser : Comparaison entre des données expérimentales et une simulation 2D basée sur la méthode CNEM - In: Congrès français de mécanique (21 ; 2013 ; Bordeaux (Gironde)), France, 2013-08-26 - Congrès français de mécanique (21 ; 2013 ; Bordeaux (Gironde)) - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Procédé de perçage par laser : Comparaison entre des données expérimentales et une simulation 2D basée sur la méthode CNEM

J. Girardot<sup>a</sup>, N. Ranc<sup>a</sup>, M. Schneider<sup>a</sup>, P. Lorong<sup>a</sup>, L. Illoul<sup>a</sup>, L. Berthe<sup>a</sup>, V. Favier<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Arts et Métiers 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 CNEM a donc été testée 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. Enfin une comparaison entre des valeurs expérimentales et des sorties des simulations sera faite suivant la puissance laser.*

**Mots clefs : laser, perçage, simulation, CNEM.**

## Abstract :

*This work presents a numerical alternative for the laser drilling simulation problem. Using finite element method is difficult to simulate the hole propagation over time, especially because of moving boundaries due to a fast phase change and high thermal gradients. First, the physical process of the laser drilling and the modeling equations are clarified. Then a comparison between experimental data and simulation outputs regarding the laser peak power is investigated.*

**Key Words : laser, drilling, simulation, CNEM.**

---

## 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/cm<sup>2</sup>, 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 laser.

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)..

Cet article présente une nouvelle approche de ce problème de simulation par l'utilisation de la méthode CNEM (Constraint Natural Element Method [5]), une méthode à mi-chemin entre celle sans maillage et celle des éléments finis. La CNEM 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 ainsi que les couplages multiphysiques avant de présenter brièvement la méthode CNEM, utilisée pour discrétiser ces équations. Ce modèle sera ensuite utilisé pour modéliser le cas test du barreau et on présentera ensuite les premiers résultats du travail de simulation du perçage laser.

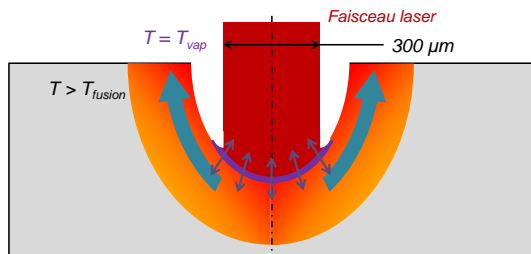


FIG. 1 – Processus physique du perçage laser.

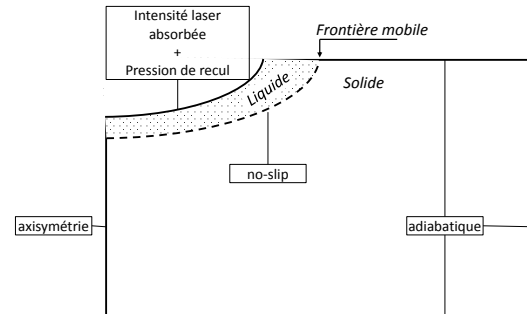


FIG. 2 – Conditions limites du modèle.

## 2 Modèle mathématique

Notre modèle se base sur l'implantation de l'équation de la chaleur dans le domaine solide et liquide et de l'équation de Navier-Stokes uniquement dans le liquide. On supposera par la suite les hypothèses suivantes :

- Le faisceau laser est circulaire et normal à la surface du matériau supposé comme homogène. Le problème peut donc être considéré axisymétrique où l'axe de symétrie est parallèle au faisceau laser et passe par son centre ;
- Les grandeurs physiques sont prises constantes dans chaque domaine (liquide et solide) et indépendantes de la température ;
- La matière liquide éjectée ainsi que celle vaporisée ne sont pas représentées géométriquement dans le calcul ;
- Le flux de chaleur appliqué sur la surface est réparti spatialement suivant une fonction dépendante de la machine de perçage utilisée et temporellement suivant la montée en charge de la source laser. La valeur de l'intensité sur l'axe est prise égale aux mesures expérimentales réalisées préalablement au moyen d'une sphère intégrante. Les lois d'absorptivité ne sont donc pas implantées dans notre modèle ;
- Le comportement mécanique du métal liquide est incompressible et newtonien ;
- La partie solide est supposée rigide et seuls les échanges thermiques sont pris en compte ;
- Les phénomènes liés aux tensions superficielles de la surface libre sont pris en compte.

### 2.1 Problème thermique

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

$$\rho_i C_{p_i} \frac{dT}{dt} = K_i \Delta T \quad (1)$$

où  $\rho_i$ ,  $C_{p_i}$  et  $K_i$  sont respectivement la masse volumique, la capacité calorifique et la conductivité thermique du domaine  $i$ . La convection thermique due à l'éjection liquide est prise en compte dans le sens où la dérivée temporelle de la température est une dérivée lagrangienne. Cette description entrainera donc un maillage mobile. Plus de détails seront donnés dans le paragraphe 3. La fusion du matériau est prise en compte au moyen d'une capacité calorifique dépendante de la température ajoutée à une fonction gaussienne centrée sur le point de fusion dont l'intégrale est égale à la chaleur latente de fusion. Les conditions limites appliquées au domaine sont représentées sur la figure 2 :

### 2.2 Problème hydrodynamique

Les mouvements dans le fluide sont décrits avec l'équation de Navier-Stokes en tenant compte des hypothèses de notre modèle :

$$\begin{cases} \rho_l \frac{d\vec{u}}{dt} = \text{div}(\vec{\sigma}) \\ \text{div}(\vec{u}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

La loi de comportement du fluide est :

$$\vec{\sigma} = -p\vec{\delta} + \mu(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T) \quad (3)$$

où  $\mu$  est la viscosité dynamique du métal liquide. Les conditions limites appliquées au domaine sont représentées sur la figure 2 :

### 2.3 Couplage aux 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 d'énergie par évaporation. Il est communément pris comme modèle, l'équation d'Hertz-Langmuir [9] 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  $\beta_r$ , [7], [8] et [9]. Notre flux de chaleur devient donc :

$$\phi(T_{surf}) = \phi_{laser} - L_v \left[ \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B}} \frac{P_{atm} \exp\left(\frac{M_a L_v}{R} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_{surf}}\right)\right)}{\sqrt{T_{surf}}} (1 - \beta_r) \right] \quad (4)$$

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] :

$$P(T_{surf}) = \left[ P_{atm} \exp\left(\frac{M_a L_v}{R} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_{surf}}\right)\right) - P_{atm} \right] \left(\frac{1 + \beta_r}{2}\right) \quad (5)$$

Les grandeurs physiques sont décrites dans le tableau suivant :

$\phi_{laser}$	Intensité laser absorbé	W.m <sup>-2</sup>
$\beta_r$	Coefficient de rétrodiffusion	
$M_a$	Masse atomique	kg
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation	J.kg <sup>-1</sup>
$T_v$	Seuil de vaporisation à pression ambiante	K°
$m$	Masse molaire	kg.mol <sup>-1</sup>
$k_B$	Constante de Boltzmann	m <sup>2</sup> .kg.s <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$R$	Constante des gaz parfait	J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$P_{atm}$	Pression atmosphérique	Pa

Table I. Grandeurs physiques dans les couplages aux conditions limites

## 3 Implémentations numériques

### 3.1 Discrétisation CNEM

La méthode CNEM (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'entraînent pas de distorsion de la maille dans la zone liquide, zone où la matière se déplace. Pour plus de renseignement, on pourra se référer aux travaux de Gonzales & al. [12] qui utilisent cette formulation dite "lagrangienne actualisée" dans le cas de la mécanique des fluides ;
- (2) Des discontinuités mobiles sont 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. Dans notre cas, la frontière mobile de fusion ne se déplace pas suivant la relation de Stefan [15] mais est repérée directement après le calcul thermique via l'isotherme de fusion.

### 3.2 Schéma d'intégration temporel

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  $n + 1$  ;

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)^{n+1} = \frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta t} \quad (6)$$

où  $\Delta t$  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. On rend le système linéaire en utilisant les températures du précédent pas de temps. Les pas de temps considérés dans ce problème étant faibles, de l'ordre de 20ns, cette méthode donne de bons résultats, notamment sur les températures de surface. Les propriétés physiques des phases liquides et solides sont celles du fer pur et la boucle de calcul est explicitée ci-après :

- 1) Calcul des champs thermiques en tenant compte de la fusion et de la vaporisation.
- 2) Maillage de la zone liquide uniquement.
- 3) Calcul des champs de vitesses dans la zone liquide.
- 4) Actualisation des domaines via les vitesses d'interfaces et du champ de vitesse.

## 4 Résultats

### 4.1 Modèle test du "barreau"

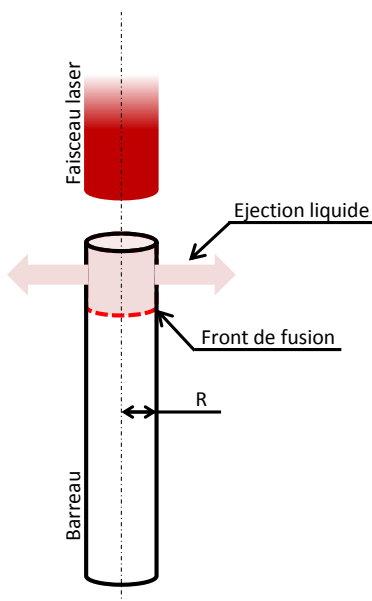


FIG. 3 – Schéma de principe du barreau.

Le modèle test du "barreau" permet de vérifier la bonne implémentation des équations tout en simplifiant la mise en œuvre numérique et les étapes de remaillage. Le faisceau laser et le barreau ont le même diamètre et l'éjection liquide provoquée par l'interaction laser/matière n'est pas suivie (voir figure 3). La simulation est effectuée suivant les équations et le schéma numérique présentés plus haut pour une géométrie 2D axisymétrique. La répartition spatiale du faisceau est constante et les propriétés thermo-physiques du matériau sont celles du fer pur. Le modèle se révèle robuste et nous permet de balayer la plage d'intensité absorbée à savoir de 5 à 20 MW/cm<sup>2</sup>. La figure 4 représente en fonction du temps la température de surface et la vitesse d'enfoncement sur l'axe de symétrie. On voit que la température de surface sature au bout d'une centaine de microseconde due à l'énergie perdue par vaporisation. La température et la vitesse de perçage augmentent avec l'intensité absorbée ce qui est la tendance observée expérimentalement. La figure 5 compare les valeurs expérimentales [14] de la température de surface au cours d'un perçage avec celles obtenues sur le modèle du barreau. La simulation prédit correctement l'ordre de grandeur de la température mais on peut noter que celle-ci est surestimée par rapport à la valeur expérimentale.

Cela provient probablement de la différence de géométrie entre les deux problèmes : un corps solide froid entoure la zone percée dans le cas du perçage alors que ce corps froid est limité à un côté dans la simulation du barreau. La différence entre les deux peut être expliquée par le faible rayon du barreau.

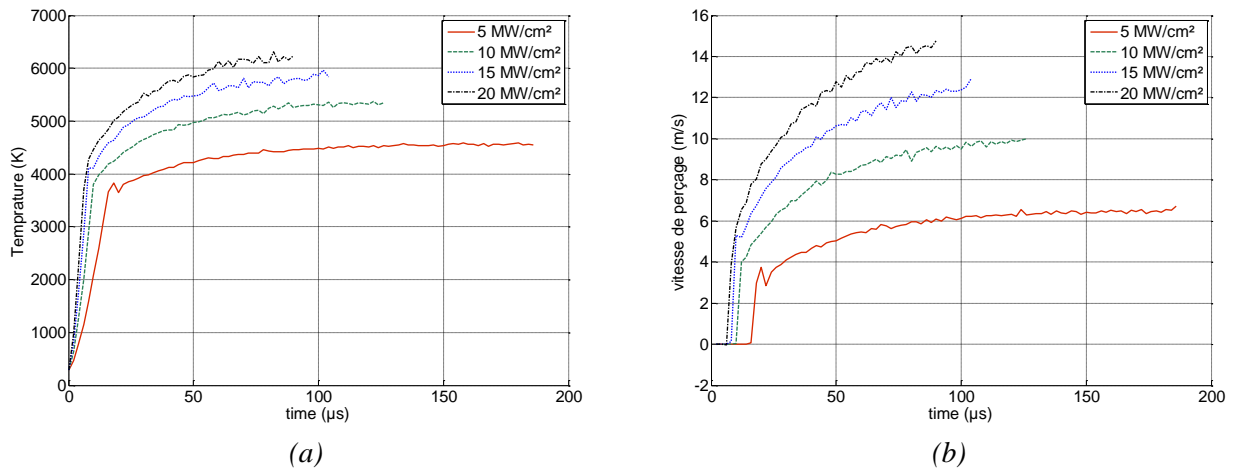


FIG. 4 – Résultats du modèle du barreau pour plusieurs intensités absorbées avec la température en surface (a) et la vitesse de perçage (b).

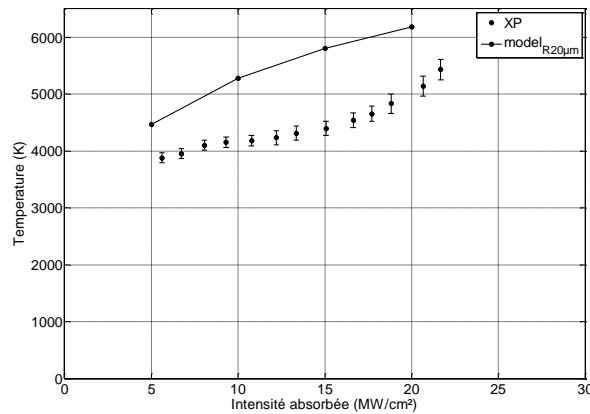


FIG. 5 – Comparaison sur la température de surface entre les résultats de simulation du modèle du barreau et des valeurs expérimentales obtenues lors de perçages laser réels [14].

## 4.2 Modèle du perçage

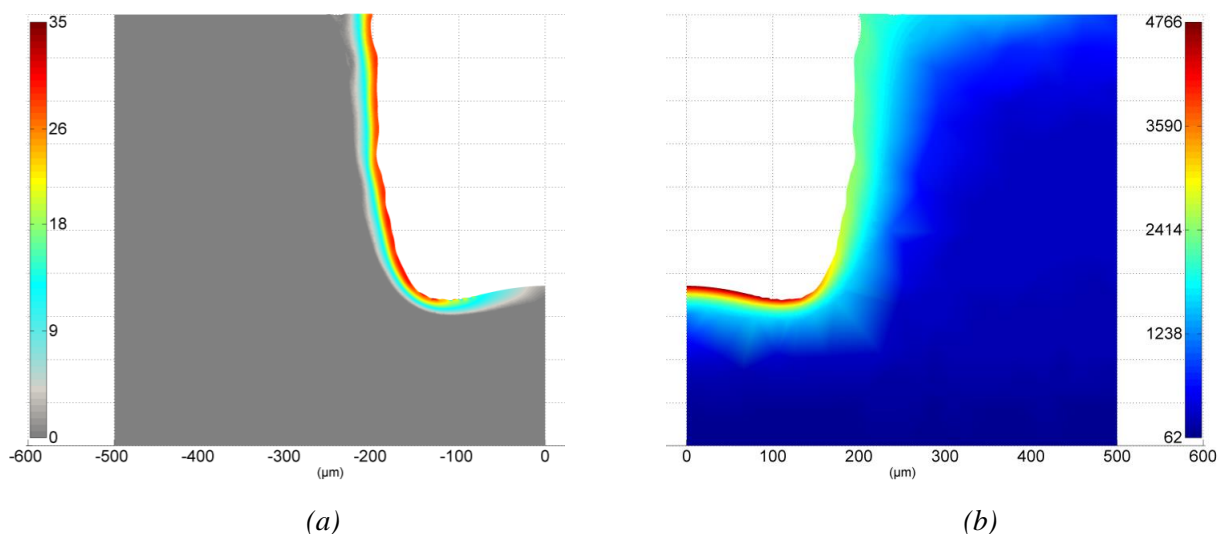


FIG. 6 – Norme de la vitesse en m/s (a) et le champ de température en Kelvin (b).

Un premier résultat de perçage laser est illustré sur la figure 6. Les champs de température et de vitesse d'éjection du liquide dans le domaine global, au bout de 182  $\mu\text{s}$ , pour un flux absorbé de 3 MW/cm<sup>2</sup> présentent de très forts gradients au voisinage du trou. Les valeurs de température de surface sont comprises entre 2000 K (en haut du trou) et 4500 K (au fond du trou). La température varie dans l'épaisseur de la zone fondue qui est de l'ordre de 20-30  $\mu\text{m}$ . Les vitesses d'éjection du liquide sont de 35 m/s sur une épaisseur de quelques dizaines de micromètres. Tous ces résultats sont en bon accord avec l'expérience [14], et sont donc très encourageants. On notera que les valeurs expérimentales de la température [14] ne sont pas des mesures directes. En effet, la température est obtenue à partir de l'observation de l'hydrodynamique du gaz au moyen d'une caméra rapide (la fréquence d'acquisition est de 100 000 i/s). Comme la température est le moteur de cet écoulement, un modèle a été proposé pour obtenir les valeurs de température utilisées pour la comparaison avec les résultats numériques.

## 5 Conclusion

Une modélisation multiphysique du perçage laser a été proposée. La méthode CNEM a été choisie pour représenter le mouvement de la frontière liquide/solide et le mouvement du liquide au cours du perçage. Les premières comparaisons entre calculs et expériences montrent la pertinence de la modélisation physique et numérique proposée. Des études comparatives plus poussées sur la géométrie des trous (profondeur, largeur, épaisseur de zone resolidifiée) et les valeurs de vitesses d'éjection liquide sont actuellement en cours.

## 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 23<sup>rd</sup> 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 23<sup>rd</sup> 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'ENSAM*, 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.
- [15] C. Vuik, "Some historical notes about the Stefan problem", *CWI Tract 90* (1993), Amsterdam.