

# Simulation multiphysique de découpe laser

## Approche Level Set - ALE

R. Meillour<sup>1,3</sup>, M. Courtois<sup>3</sup>, I. Doyen<sup>1</sup>, C. Nahed<sup>2</sup>, M. Carin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherche en Matériaux et procédés Avancés, 91191, Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études Mécaniques et Thermiques, 91191, Gif-sur-Yvette, France

<sup>3</sup> Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, 56100 Lorient, France

**Résumé** — Un modèle numérique thermohydrodynamique de découpe est étudié dans le but de prédire et de quantifier l'énergie laser résiduelle appliqué au démantèlement d'installations nucléaires. Une approche Level Set - ALE permet de suivre dynamiquement l'interface gaz-métal et de convertir cette dernière en une frontière discrète. La quantification de l'énergie laser résiduelle est abordée par la méthode lancer de rayons grâce au couplage entre les logiciels COMSOL Multiphysics® et Matlab®. Le métal en fusion ainsi que l'écoulement dynamique sous l'effet des forces du gaz de chasse sont résolus afin de prédire la forme de la saignée de découpe en fonction des paramètres opératoires.

**Mots clés** — Découpe laser, énergie laser résiduelle, modélisation multiphysique, modèle thermohydrodynamique, Level Set, ALE, lancer de rayons.

## 1 Introduction

Le procédé de découpe laser, principalement utilisé pour usiner des pièces, connaît également une application dans le secteur du démantèlement. Ce procédé se réalise sans contact direct avec la pièce à découper et évite un renouvellement fréquent des outils provoqué par la friction dans le cas d'une découpe mécanique (fraisage, perçage, etc). Dans ce procédé, un faisceau laser met en fusion le métal et un gaz de chasse expulse la matière fondue (Figure 1). L'énergie laser se sépare en deux parties, d'un côté celle absorbée par la matière et de l'autre celle réfléchie ou directement transmise atteignant l'arrière-plan. Cette dernière, nommée énergie laser résiduelle, peut impacter thermiquement et mécaniquement les structures situées en arrière-plan et affecter leur intégrité ce qui pourrait induire des problèmes d'étanchéité et de tenue mécanique. L'objectif de ces travaux est de modéliser le procédé de découpe laser afin de comprendre, prédire et quantifier la répartition de l'énergie laser résiduelle en fonction des paramètres opératoires. La distribution énergétique du faisceau laser, le débit du gaz de chasse ainsi que la vitesse de déplacement de l'outil sont les principaux paramètres opératoires étudiés.

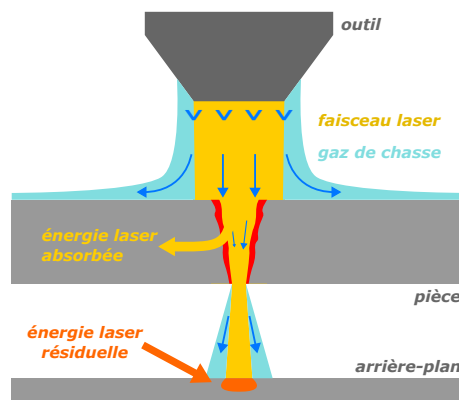


FIGURE 1 – Description du procédé de découpe laser.

La simulation numérique de la découpe laser dans la littérature s'applique en grande majorité à l'optimisation de la qualité de découpe lors de procédés d'usinage. Les travaux étudient l'influence des paramètres opératoires sur les champs de température et de vitesse le long de la saignée (trait de découpe)

[1], le profil du front de découpe [2] en fonction de la longueur d'onde du faisceau laser [3], la formation de striations [4] et comparent les simulations avec des résultats expérimentaux [5]. Rares sont les auteurs qui modélisent la propagation du faisceau laser [6] et l'écoulement du gaz de chasse [7, 8].

Dans le cadre du démantèlement, une bonne qualité de découpe n'est pas recherchée. L'intérêt ici porte sur la prédiction de l'énergie laser résiduelle, par conséquent la propagation du faisceau laser doit être modélisée le plus finement possible. Aussi, les épaisseurs étudiées dans la littérature restent très faibles ( $< 5\text{ mm}$ ) comparées à celles visées pour ces travaux ( $> 50\text{ mm}$ ) ce qui demande d'importants travaux numériques et une réflexion sur les méthodologies employées. Enfin, la prédiction fine des réflexions du laser repose sur une description précise du front de découpe et donc de l'écoulement du métal liquide qui requiert des méthodologies numériques particulières.

## 2 Dispositif expérimental

Des expériences de découpe sont menées au LTA du CEA Saclay et contribuent à la validation du modèle numérique. L'objectif est d'observer par caméra rapide d'une part l'énergie résiduelle au niveau d'un arrière-plan en graphite (placement 1, Figure 2) situé à  $1,5\text{ m}$  de la pièce, et de l'autre directement le front de découpe (placement 2) où  $30\text{ mm}$  sépare la buse de l'outil de découpe laser.

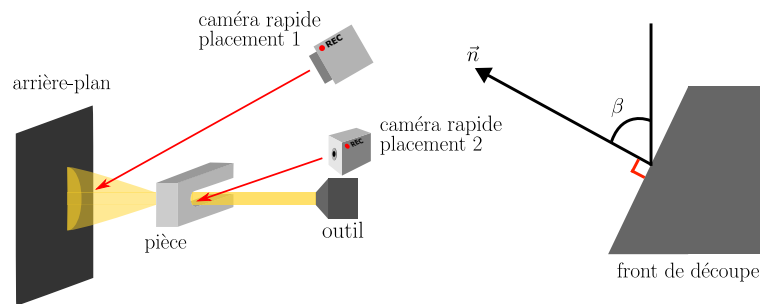


FIGURE 2 – Schéma du dispositif expérimental.

Les premiers essais, réalisés avec le matériel de visualisation de l'IRDL, ont permis de développer des méthodes pour caractériser l'angle du front de découpe " $\beta$ " (Figure 2) grâce aux observations par caméra rapide et des relations trigonométriques. Les angles de découpe déterminés à l'aide des deux observations par caméra rapide sont exposés sur la figure 7 et contribuent à la validation du modèle en comparant ces angles avec ceux issus des simulations.

## 3 Présentation du modèle multiphysique

La description du procédé de découpe laser dans la partie 1 démontre un problème multiphysique. L'évolution de la température est régie par le transfert thermique à travers l'équation de la chaleur (Équation 1) et l'éjection de la matière fondue par la mécanique des fluides avec les équations de conservation de la masse (Équation 3) et de quantité de mouvement (Équation 4). Le métal (solide et liquide) ainsi que le gaz ambiant sont modélisés, de ce fait une interface entre ces deux phases (métallique et gazeuse) doit être intégrée au problème. La modélisation de cette interface passe par l'intégration d'une troisième équation aux dérivées partielles (EDP) appelée "frontière libre", elle permet de capturer dynamiquement l'interface. A ce jour, les effets liés à l'oxydation durant une découpe sous air (réaction exothermique) ne sont pas pris en compte dans le modèle. Les couplages entre les groupes d'EDP sont représentés sur la figure 3.

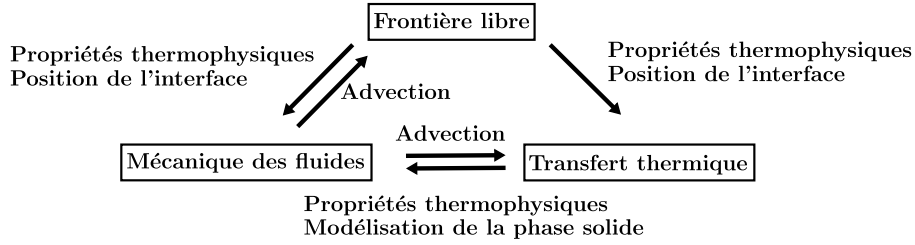


FIGURE 3 – Récapitulatif des interactions entre les physiques

L'équation 1 régit la température en supposant que les matériaux sont homogènes et isotropes :

$$\rho_\phi c p_\phi \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T \right] = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_\phi \vec{\nabla} T) + (Q_{laser} + Q_{vap} + Q_{ray}) \delta(\phi) \quad (1)$$

Où  $Q_{vap}$  et  $Q_{ray}$  sont respectivement les pertes thermiques par évaporation [9] et par rayonnement [10].

La propagation du faisceau dans le modèle thermohydrodynamique de découpe laser n'est pas modélisée. La partie relative à la propagation du faisceau pour déterminer l'énergie laser résiduelle est abordée dans la partie 5. Pour pallier cela, un terme source  $Q_{laser}$  est introduit dans l'équation de la chaleur et prend en compte les paramètres du faisceau laser ainsi que les interactions laser-matière à travers un coefficient d'absorption  $\mathcal{A}_{moy}$  dépendant de l'angle d'incidence [1].

$$Q_{laser} = \mathcal{A}_{moy} \frac{P_{laser}}{\pi w_0^2} f_{top-hat} \quad (2)$$

Avec  $P_{laser}$  [W] et  $w_0$  respectivement la puissance et le rayon au plan focal du faisceau laser et  $f_{top-hat}$  une fonction représentant une distribution de type "top-hat" [10].

Le procédé de découpe laser est un problème de mécanique des fluides fortement non-linéaire, pour parvenir à simplifier ce problème, plusieurs hypothèses sont émises :

- Les fluides (gaz - métal liquide et solide) sont supposés être incompressibles et newtoniens ;
- Au vu de la complexité du problème hydrodynamique de l'écoulement supersonique du gaz de chasse, ce dernier n'est pas modélisé directement. Les efforts liés au gaz de chasse sont pris en compte à travers une force de friction et une pression dynamique équivalente [5] ;
- Le régime hydrodynamique est considéré comme laminaire au vu de l'hypothèse précédente ;
- Les forces de flottabilité liées à la variation de la masse volumique avec la température sont négligées compte tenu des efforts relatifs au gaz de chasse prépondérants.

Les équations 3 et 4 résolvent, en considérant les hypothèses émises précédemment, le champ de vitesse  $\vec{u}$  et la pression  $p$  sur l'ensemble du domaine :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho_\phi \left[ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right] = \vec{\nabla} \cdot \left[ -pI + \mu_\phi \left( \vec{\nabla} \vec{u} + (\vec{\nabla} \vec{u})^T \right) \right] + \vec{F}_v \quad (4)$$

$$\vec{F}_v = \vec{F}_g + \left( \vec{F}_{ts} + F_{p\,dyn} \vec{v}_g + F_{fric} \right) \delta(\phi) + F_{Darcy} \quad (5)$$

$$\vec{F}_{ts} = \sigma \kappa \vec{n} \quad (6)$$

$$F_{p\,dyn} = \frac{1}{2} \rho_g |\vec{v}_g|^2 \cdot \hat{v}_g \quad \forall T > T_{lim} \quad (7)$$

$$F_{fric} = 2 \sqrt{\frac{\rho_g \mu_g}{d}} |\vec{v}_g|^{\frac{3}{2}} \cdot \hat{v}_g \quad \forall T > T_{lim} \quad (8)$$

Où  $\vec{F}_v$  correspond à l'ensemble des forces s'exerçant sur les fluides telles que la gravité  $\vec{F}_g$ , la tension de surface  $\vec{F}_{ls}$ , la pression dynamique  $F_{p\,dyn}$ , la force de friction  $F_{fric}$  et la condition de Darcy  $F_{Darcy}$ . Cette dernière est une méthode permettant de modéliser la phase solide en amortissant sa vitesse afin de tendre vers une valeur proche de  $0\,m.s^{-1}$  [11].

Les précédents termes sources décrits dans les équations (6,7 et 8) dépendent de  $\sigma$  le coefficient de tension de surface [ $N.m^{-1}$ ],  $\kappa$  la courbure de l'interface [ $m^{-1}$ ],  $\vec{n}$  le vecteur normal,  $\rho_g$  et  $\mu_g$  respectivement la masse volumique [ $kg.m^{-3}$ ] et la viscosité dynamique [ $Pa.s$ ] du gaz (air ici),  $v_g$  la vitesse du gaz de chasse et  $T_{lim}$  la température d'activation des efforts liés aux gaz de chasse fixée à la température du liquidus de l'acier 304L (soit  $1727\,K$ ).

La méthode de frontière abordée dans ces travaux est une approche eulérienne nommée "Level Set". Cette méthode consiste à définir initialement une variable  $\phi$  sur l'ensemble du domaine (Figure 4) correspondant à une phase, soit arbitrairement les valeurs 0 pour le gaz et 1 pour le métal. Au voisinage de l'interface,  $\phi$  varie entre ces deux valeurs de manière continue et suit une fonction lissée de type "Heaviside". L'interface n'est alors plus décrite comme la réalité de manière discontinue. La variation de  $\phi$  dans la zone de transition (interface) dévoile un paramètre  $\delta(\phi)$  (Équation 10), une fonction gaussienne centrée à l'interface gaz-métal ( $\phi = 0,5$ ) correspondant à la dérivée de la fonction Heaviside approximée. Cette fonction gaussienne permet d'appliquer toutes les forces et énergies théoriquement surfaciques dans un petit volume représentatif de l'interface (voir Équations 5 et 1). Les propriétés thermophysiques des matériaux diffèrent en fonction de la phase et dépendent de la variable  $\phi$  (voir Équation 11). L'équation de transport (9) régit la méthode Level Set et se déplace à travers le vecteur vitesse  $\vec{u}$  via le terme d'advection.

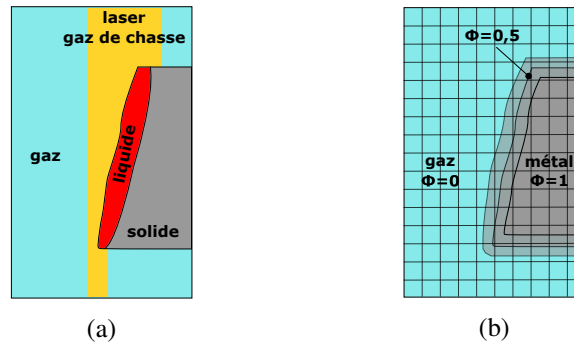


FIGURE 4 – (a) Vue 2D du problème & (b) Principe de la méthode Level Set.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \phi = \gamma \cdot \vec{\nabla} \left[ \epsilon_{ls} \vec{\nabla} \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\vec{\nabla} \phi}{|\vec{\nabla} \phi|} \right] \quad (9)$$

$$\delta(\phi) = -6 \vec{\nabla} \phi \cdot \phi(\phi - 1) \quad (10)$$

$$\alpha = \alpha_{gaz} + (\alpha_{metal} - \alpha_{gaz}) \phi \quad (11)$$

La fonction  $\delta(\phi)$  apparaît en facteur de certains termes sources (Équations 1 et 5) ce qui permet de déposer au niveau de l'interface les efforts concernés.

## 4 Résultats

Des premières simulations ont été réalisées en géométrie 2D et 3D afin de vérifier la faisabilité. La figure 5 montre l'allure du front de découpe d'une simulation 2D sur faible épaisseur ( $5\,mm$ ) avec les paramètres opératoires suivants :  $P_{laser} = 8\,kW$ ,  $v_d = 20\,mm.s^{-1}$  et  $Qv_{gaz} = 400\,L.min^{-1}$ . La figure

6 indique des températures maximales atteintes inférieures à  $2000\text{ K}$ , soit loin de celle de vaporisation de l'acier 304L ( $> 3000\text{ K}$ ) ainsi qu'une vitesse d'éjection du métal fondu sous forme de vaguelettes avoisinant les  $3,5\text{ m.s}^{-1}$  pour ces paramètres opératoires. L'épaisseur de la couche de métal liquide (zone rouge Figure 5) est fine, en effet lorsque le métal dépasse la température du liquidus les efforts liés au gaz de chasse s'activent. Par conséquent, au vu de la vitesse d'éjection, la matière fondue interagit peu avec le faisceau laser et n'a donc pas le temps de monter à des hautes températures.

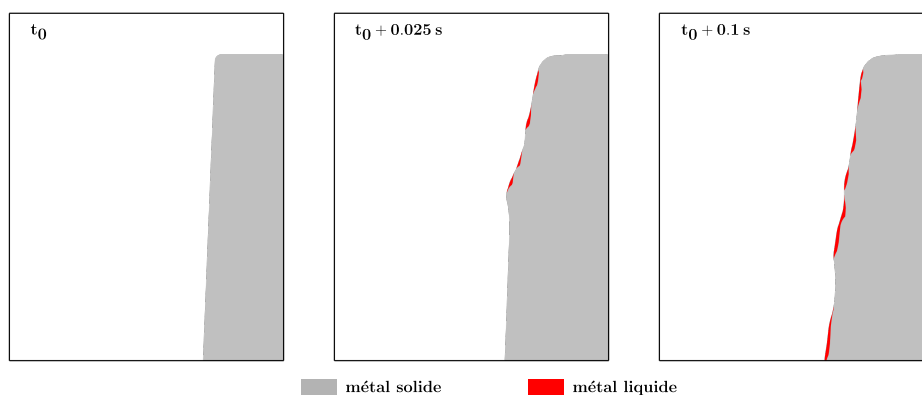


FIGURE 5 – Simulation 2D - avant découpe ( $t_0$ ), début de découpe ( $t_0 + 0,025\text{ s}$ ) et régime établi ( $t_0 + 0,1\text{ s}$ ).

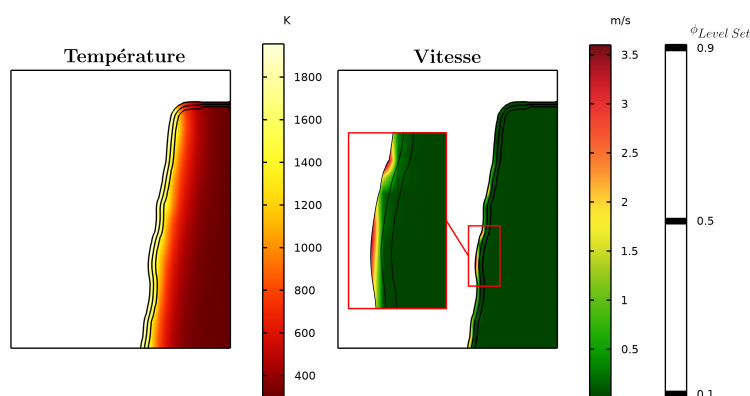


FIGURE 6 – Champs de température et de vitesse du métal lors d'une simulation 2D.

Les angles de découpe déterminés avec les observations par caméra rapide (arrière-plan et directe du front de découpe) et issus des simulations 2D sont comparés sur la figure 7. Les angles déduits expérimentalement sont cohérents, en effet lorsque la vitesse de déplacement augmente l'angle décroît. Ces angles sont également concordants au vu de leurs faible dispersion et allure.

Les angles de découpe des simulations 2D suivent également une décroissance avec une vitesse de déplacement qui s'élève, cependant l'écart augmente considérablement avec cette élévation. Ces différences s'expliquent par la description de l'interface avec la méthode Level Set. Les paramètres liés à cette méthode telle que l'épaisseur de la zone de transition  $\epsilon_{ls}$  (Équation 9) sont sensibles et impactent fortement le transfert thermique et la mécanique des fluides. En effet, les termes sources appliqués à l'interface dépendent de la fonction  $\delta(\phi)$ , par conséquent une forte épaisseur de transition tend à dégrader la description de ces phénomènes physiques interfaciaux. Il convient alors de décrire correctement l'interface avec une épaisseur d'interface la plus fine possible tout en conservant un maillage acceptable (lié aux temps de calcul). L'écart entre les simulations et les observations provient également de la réaction exothermique (oxydation du métal dans l'air) existante lors des essais expérimentaux de découpe sous air. Ce phénomène physique s'ajoutant à l'apport thermique du laser n'est pas considéré dans le modèle présenté ici.

D'autres essais de faisabilité ont été effectués en géométrie 3D sur  $5\text{ mm}$  d'épaisseur avec un débit de

gaz de chasse plus faible ( $Qv_{gaz} = 200 L.min^{-1}$ ) afin d'assurer la convergence de la simulation. La figure 8 montre le champ de température de la phase métallique solide, le métal liquide ( $\forall T > T_{solidus}$ ) ainsi que la direction de l'écoulement.

Les temps de calcul, pour une épaisseur de 5 mm et un temps simulé vrai de 0,1 s, sont de l'ordre de 2h pour une géométrie 2D et de 40h pour une géométrie 3D. Par conséquent, un travail d'optimisation du modèle devra être réalisé pour réduire davantage les temps de calcul (en préservant les informations pertinentes).

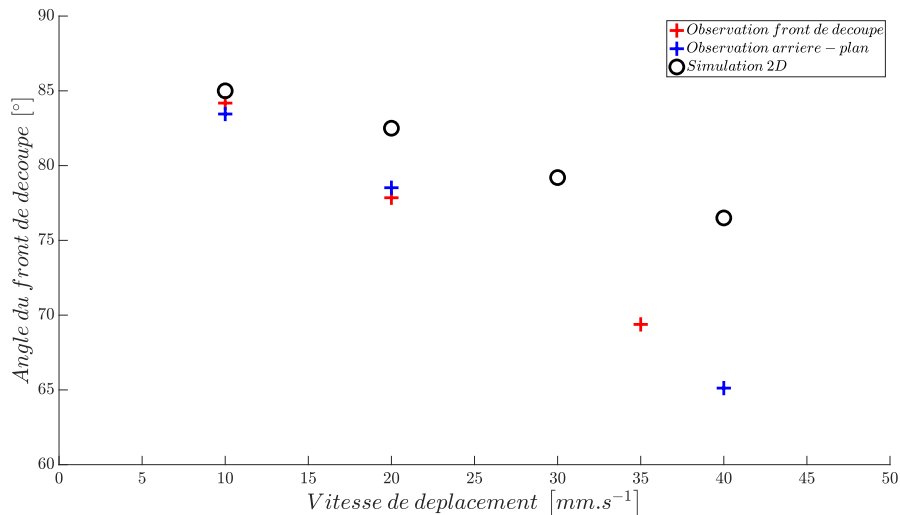


FIGURE 7 – Angles de découpe issus des essais préliminaires sous air et comparaison avec les résultats du modèle 2D -  $ep_{piece} = 5 mm$ ,  $P_{laser} = 8 kW$  et  $Qv_{gaz} = 400 L.min^{-1}$ .

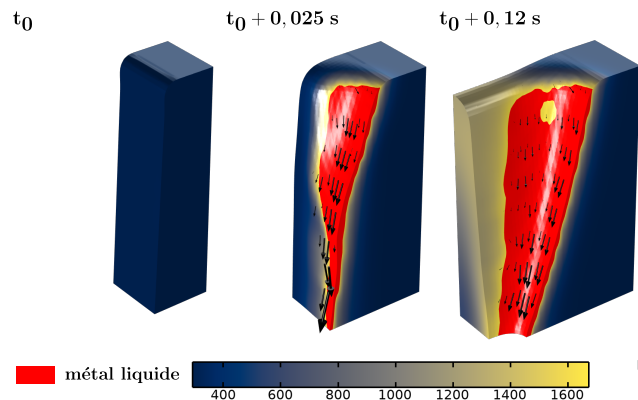


FIGURE 8 – Simulation 3D - avant découpe ( $t_0$ ), début de découpe ( $t_0 + 0,025 s$ ) et régime établi ( $t_0 + 0,12 s$ ) -  $P_{laser} = 8 kW$ ,  $v_d = 35 mm.s^{-1}$  et  $Qv_{gaz} = 200 L.min^{-1}$ .

## 5 Quantification de l'énergie laser résiduelle

Pour quantifier l'énergie laser résiduelle, c'est-à-dire l'énergie non absorbée par la matière qui va potentiellement interagir avec l'arrière-plan, il est nécessaire de modéliser la propagation du faisceau laser. La lumière peut être décrite par l'approche ondulatoire avec les équations de Maxwell [11] ou par l'approche corpusculaire avec la méthode du lancer de rayons [12]. Ces deux approches ont été étudiées dans ces travaux et les conclusions révèlent que l'approche électromagnétique nécessite des ressources informatiques trop importantes et inaccessibles à l'heure actuelle au vu des fortes épaisseurs envisagées pour ces travaux. La méthode du lancer de rayons ("ray tracing") est une méthode dite "meshless" impliquant peu de mémoire vive et autorisant donc les grandes géométries. Cependant, cette approche n'est

pas compatible avec la méthode Level Set puisque les rayons requièrent une interface gaz-métal discrète pour qu'ils subissent des réflexions sur la paroi (front de découpe). Pour pallier ce problème, une méthode de maillage mobile nommée Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) est ajoutée au modèle afin de convertir l'interface gaz-métal continue sous forme discrète. Le maillage ALE suit en couplage faible avec le modèle de découpe l'isovaleur  $\phi = 0,5$ , c'est-à-dire l'interface.

Les rayons, assimilés à des photons, se déplacent à la vitesse de la lumière. Le lancer de rayons n'étant pas traitable avec une étude stationnaire, il convient de résoudre un second problème temporel. Le modèle thermohydrodynamique de découpe laser est calculé avec un pas de temps de l'ordre de  $10^{-5}$  s, un temps nettement plus important que la durée d'un lancer de rayons dans le domaine ( $t_{vrai} \ll 10^{-10}$  s). Pour surmonter cette difficulté, un couplage entre COMSOL Multiphysics® et Matlab® est en cours de développement. Ce couplage consiste à réaliser un lancer de rayons sur une géométrie fixe provenant d'instant choisis du modèle de découpe en respectant le schéma temporel des rayons (Figure 9).

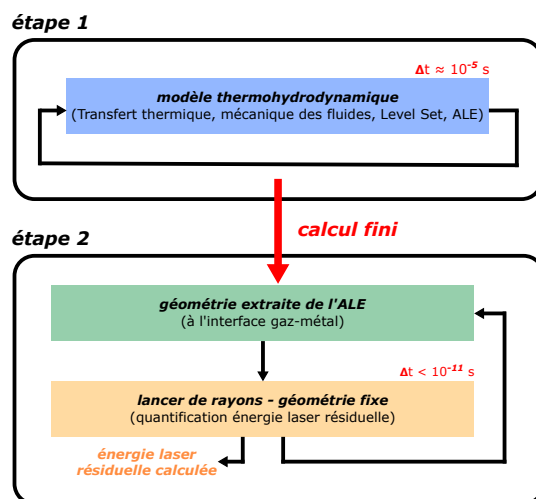


FIGURE 9 – Schéma de résolution du couplage modèle thermohydrodynamique - lancer de rayons.

La figure 10 montre la procédure pour quantifier l'énergie laser résiduelle à deux instants du modèle de découpe. Une fois le maillage ALE extrait à un instant  $t$  choisi par l'utilisateur, une géométrie est créée à partir de ce maillage. Ensuite, les conditions aux limites sont appliquées et un nouveau maillage optimisé pour le lancer de rayons est construit. La dernière étape consiste à récupérer les données des rayons atteignant la face inférieure du domaine afin de quantifier la puissance perçue par l'arrière-plan et de convertir en une cartographie de puissance surfacique.

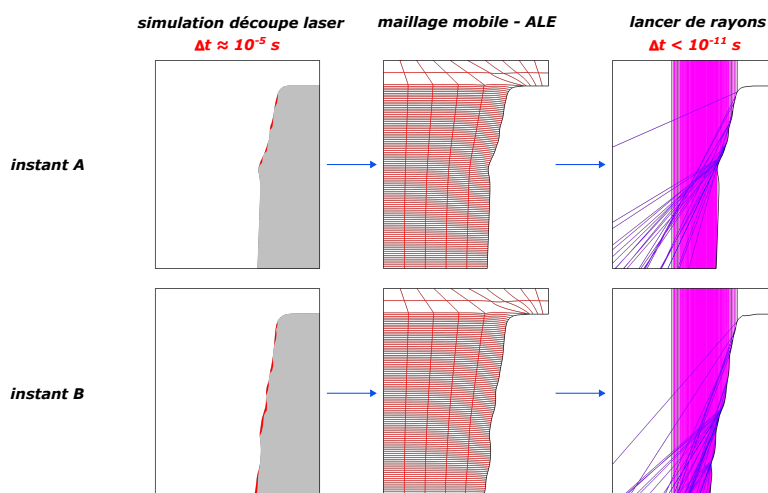


FIGURE 10 – Étapes pour quantifier l'énergie laser résiduelle.

## 6 Conclusion

Des modèles 2D et 3D thermohydrodynamiques de découpe laser ont été présentés considérant certaines hypothèses simplificatrices telles que la modélisation du gaz de chasse à travers des forces de friction et de pression dynamique et la distribution énergétique du faisceau laser à travers un terme source. Ce modèle est confronté à des observations expérimentales par caméra rapide afin de comparer les angles du front de découpe (issus des deux observations étudiées) et les propriétés intrinsèques des vaguelettes (observation directe du front de découpe) avec les simulations. La quantification de l'énergie laser résiduelle, par la méthode du lancer de rayons, se réalise en couplage faible avec le modèle thermohydrodynamique à frontière libre. En effet, la trajectoire des rayons dépend de la géométrie (*via* maillage ALE) du front de découpe alors que les rayons n'impactent pas le modèle de thermohydrodynamique (transfert thermique, mécanique des fluides et Level Set).

Les simulations présentées modélisent la découpe laser sur faibles épaisseurs (5 mm) sous ambiance inerte. À l'avenir, les simulations envisagées atteindront des épaisseurs plus réalistes allant jusqu'à 50 mm. De plus, les effets de la découpe laser sous oxygène présents dans les premiers essais expérimentaux ne sont pas modélisés dans les modèles actuels. Par conséquent, des essais de découpe sous azote sont prévus afin de s'affranchir de ce phénomène physique expérimentalement et d'être plus proche des hypothèses émises dans le modèle. Parmi les perspectives, des recherches sont prévues pour considérer les effets d'oxydation (réaction exothermique). Enfin, au vu des géométries attendues, un travail d'optimisation de temps de calcul devra être effectué en conservant une bonne description des phénomènes physiques existants.

## Références

- [1] K. Kheloufi and E.H. Amara. Numerical Investigation of the Effect of Some Parameters on Temperature Field and Kerf Width in Laser Cutting Process. *Physics Procedia*, 39 :872–880, January 2012.
- [2] E.H. Kheloufi, K. Amara and A. Benzaoui. Numerical Simulation of Transient Three-Dimensional Temperature and Kerf Formation in Laser Fusion Cutting. *Journal of Heat Transfer*, 137(11), June 2015.
- [3] E. H. Amara, T. Aoudjit, K. Kheloufi, T. Tamsaout, S. Aggoune, A. Ahmanache, F. Hamadi, and K. Bougherara. Simulation by temperature gradient adaption of wavelength effect in metal laser cutting. *Journal of Laser Applications*, 29(2) :022209, May 2017.
- [4] E. H. Amara, K. Kheloufi, and T. Tamsaout. Wavelength effect on striation formation during metal laser cutting. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2015(1) :950–954, October 2015.
- [5] E. H. Amara, K. Kheloufi, T. Tamsaout, R. Fabbro, and K. Hirano. Numerical investigations on high-power laser cutting of metals. *Applied Physics A*, 119(4) :1245–1260, June 2015.
- [6] S. Kohl and M. Schmidt. Numerical analysis of the influence of beam characteristics onto the process dynamics during laser cutting. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2013(1) :104–109, October 2013.
- [7] T. Tamsaout, E. H. Amara, and A. Bouandallah. *Three-dimensional modelling of laser cutting process with compressible and incompressible assisting gas*. December 2015.
- [8] M. S. Gross. On gas dynamic effects in the modelling of laser cutting processes. *Applied Mathematical Modelling*, 30(4) :307–318, April 2006.
- [9] Koji Hirano and Remy Fabbro. Experimental investigation of hydrodynamics of melt layer during laser cutting of steel. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 44(10) :105502, February 2011.
- [10] S. Morville. *Modélisation multiphysique du procédé de Fabrication Rapide par Projection Laser en vue d'améliorer l'état de surface final*. PhD thesis, Université de Bretagne Sud, 2012.
- [11] M. Courtois, M. Carin, P. Le Masson, S. Gaied, and M. Balabane. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 46(50) :505305, November 2013.
- [12] Y. A. Mayi, M. Dal, P. Peyre, M. Bellet, and R. Fabbro. Physical mechanisms of conduction-to-keyhole transition in laser welding and additive manufacturing processes. *Optics & Laser Technology*, 158 :108811, February 2023.