



**HAL**  
open science

# Simulations d'applications lasers : du développement à la validation

Morgan Dal

► **To cite this version:**

Morgan Dal. Simulations d'applications lasers : du développement à la validation. Génie des procédés. Cnam, 2020. tel-04101951

**HAL Id: tel-04101951**

**<https://hal.science/tel-04101951v1>**

Submitted on 25 May 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE, D'ENSEIGNEMENT ET D'ENCADREMENT

Etablie pour l'obtention de  
L'HABILITATION À DIRIGER LA RECHERCHE

## Simulations d'applications lasers : du développement à la validation

*Morgan Dal*



Présentation prévue le 15 Novembre 2020 devant le Jury composé de :

*Président*

Marc Médale, Professeur des Universités, IUSTI, Université Aix-Marseille

*Rapporteurs*

Cyril Bordreuil, Professeur des Universités, LMGC, Université Montpellier II

Pierre Sallamand, Professeur des Universités, ICB, utbm

Rudolf Weber, équivalent Professeur des Universités, IFSW, Université de Stuttgart

*Examineurs*

Muriel Carin, Professeure des Universités, IRDL, Université de Bretagne Sud

Rémy Fabbro, Directeur de Recherche CNRS émérite, PIMM, ENSAM

Patrice Peyre, Directeur de Recherche CNRS, PIMM, ENSAM

Charles-André Gandin, Directeur de Recherche CNRS, Cemef, Mines ParisTech

Ecole doctorale 432, "Sciences des Métiers de l'Ingénieur"

# Remerciements



# Introduction

Depuis mon recrutement en 2012, par l'ENSAM au sein du laboratoire PIMM, j'ai pu partager mon temps entre différentes actions de recherche, de pédagogie et d'administration ou d'organisation.

Les activités de recherche présentées dans la suite de ce document, sont essentiellement orientées selon deux axes, la simulation numérique des applications lasers et la mesure des propriétés thermophysiques de métaux en phase liquide. Associées à la validation expérimentale des modèles, elles représentent le triptyque "simulation, validation et mesure de propriétés" dont les interactions majeures sont présentées sur la figure 1 et qui seront explicitées dans la suite de ce document. De manière générale, elles ont été réalisées avec comme objectif d'apporter un complément de connaissance et de compréhension des procédés. En plus de l'intérêt scientifique du travail de développement et de validation, les modèles sont utilisés afin d'obtenir et d'analyser des observables difficilement accessibles expérimentalement. Une fois la compréhension accrue grâce à cette interaction numérique-expérimentale, les modèles peuvent être paramétrés en vue de l'optimisation des procédés. Cette démarche vient en complément des activités plutôt expérimentales de l'équipe.

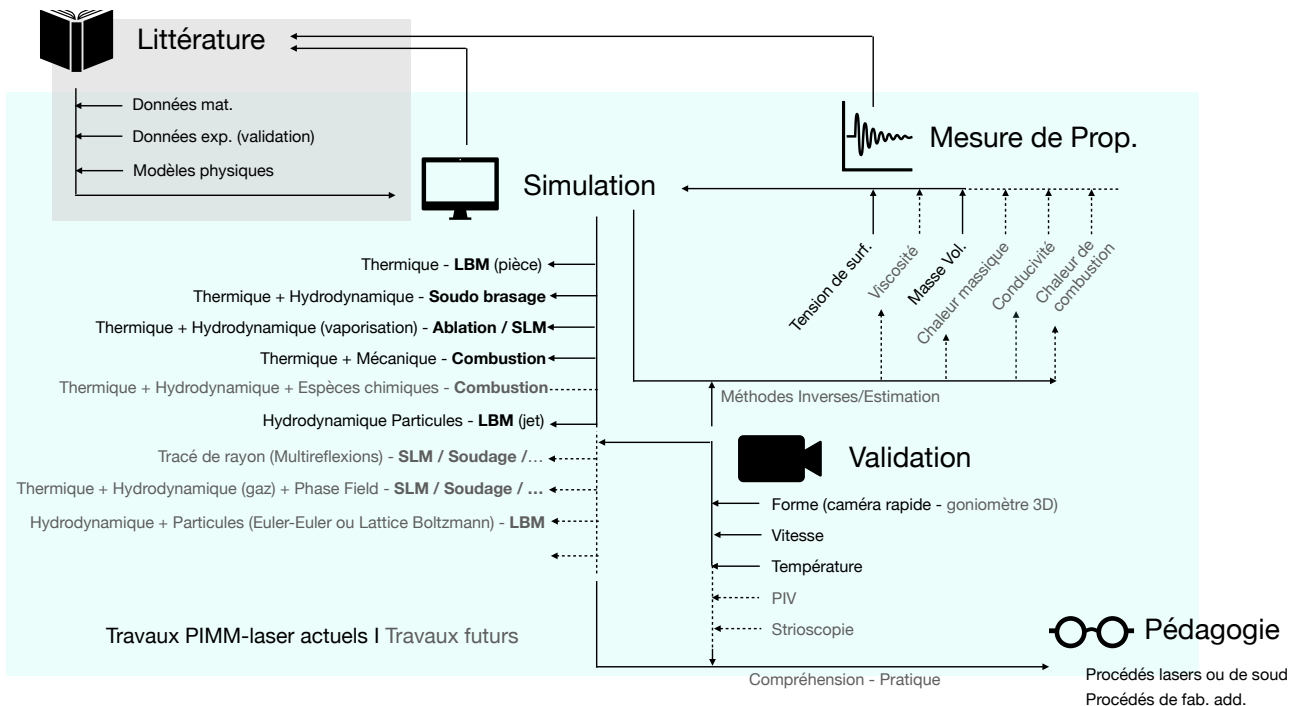


FIGURE 1: Logigramme récapitulatif des activités

- **La simulation numérique** est un outil particulièrement utile et nécessaire pour l'optimisation des procédés lasers. Les applications sont en effet assez intenses ( $> 1 \text{ MW cm}^2$ ). Le perçage, le soudage, la découpe et la fabrication additive font intervenir des processus physiques complexes. Pour l'exemple, citons les vitesses d'éjection de vapeur métallique durant le perçage qui peut être extrêmement rapide (supersonique)



et donc affecter la qualité du perçage, ou les vitesses d'écoulement du métal liquide en soudage, également importantes, qui peuvent être à l'origine d'instabilités hydrodynamiques. De même, les températures et les pressions sont généralement localement très élevées, respectivement, supérieures au point de vaporisation d'un métal et de plusieurs dizaines de bars. Ces observables, vitesse, température et pression, nécessaires à la compréhension, sont difficiles à mesurer expérimentalement mais restent accessibles numériquement. Cependant ces phénomènes ne sont pas simples, non plus, à traiter numériquement et les analyses basées sur la simulation peuvent parfois, en fonction des objectifs visés, être réalisées à partir de physiques simplifiées. La validité du modèle doit donc être vérifiée afin de garantir l'analyse qui en résultera.

C'est selon cette approche qu'est organisée cette activité de recherche et c'est aussi de cette manière qu'elle sera présentée dans ce document. Certaines actions de recherche sous ma responsabilité sont ainsi résumées afin d'illustrer la capacité d'un modèle plus ou moins simplifié à être utilisable et valorisable scientifiquement. Pour en simplifier la lecture, les exemples sont organisés par complexité croissante. Pour commencer, un modèle de transfert de chaleur seul sera présenté dans le cadre de la fabrication additive par projection de poudre. Ensuite, en ajoutant la résolution de la mécanique des fluides, un cas de soudo-brasage pourra être traité. A cela, s'ajoutera dans un troisième temps le phénomène de vaporisation permettant l'analyse de cas de perçage/ablation et de fabrication additive par fusion de lit de poudre. Sont ensuite présentées des études faisant apparaître des compléments potentiels à ces simulations, tels que la mécanique du solide ou le suivi de particules projetées. Pour finir cette première étape, les moyens de mesure que nous utilisons ou développons pour assurer la validation des modèles seront présentés.

- La connaissance des **propriétés thermophysiques** des matériaux traités dans les modèles est un point clef à la réalisation de simulations de qualité. Pour cette raison, mon second investissement en terme de recherche porte sur cette thématique. Ici encore, la démarche est séquentielle et de difficulté croissante. Les propriétés visées sont, la tension de surface, la masse volumique, la viscosité, la conductivité thermique et la capacité calorifique. Pour le moment, seules les deux premières sont suffisamment finalisées et seront donc détaillées ici.

Notons que cette démarche couplée tient grandement à l'environnement expérimental de l'équipe, notamment en terme de moyens lasers et de diagnostiques, qui est particulièrement favorable à la validation des modèles et au développement d'essais simples, pour les mesures de propriétés.

Les activités d'enseignement que j'ai eu l'occasion de mener, en parallèle des activités de recherche, font intervenir trois aspects fondamentaux, l'administration de parties de formations, la reconstruction de modules d'enseignements et bien-sûr le face à face pédagogique. Dans le manuscrit, chacune des ces actions est explicitée afin d'illustrer de mon intérêt et de mon engagement dans la pédagogie menée au sein de l'école.

D'un point de vue administratif, trois cas sont présentés, la gestion d'une option dans le parcours apprentissage, d'une filière dans le master MAGIS porté en partie par l'école et d'un module de formation par projet. Ensuite, un descriptif des matières et modules repris, rénovés ou reconstruits, est réalisé en détaillant rapidement les points clefs de ces actions. Pour finir, cette partie se termine par un bilan de charge annuelle sur les huit

dernières années et une illustration du rapport CM/TD/TP.

Les collaborations académiques - industrielles et les financements publics auxquels j'ai pu participer sont répertoriés dans un troisième chapitre. A ce dernier s'ajoutent les différentes responsabilités scientifiques que j'ai pu avoir en plus de mes activités de recherche individuelles. Notons que ces collaborations et financements ont bien-sûr été proposés de manière à alimenter, financièrement et scientifiquement, les actions de recherche que je vise.

Pour finir, les  futures travaux et perspectives  sont présentés selon quatre points de vues, recherche, managériale, valorisation et pédagogique. Si les actions de recherches sont plus détaillées, scientifiquement et temporellement, les autres prennent place dans une perspective globale à 3 ou 4 ans.

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>I "Activités de Recherche"</b>	<b>7</b>
A- Résumé des activités de recherche . . . . .	7
B- Simulation numérique des procédés lasers et validation . . . . .	9
Introduction . . . . .	9
1. Problème thermique - Projection de poudre simplifiée . . . . .	10
2. Problème thermo-hydrodynamique sans vaporisation - Soudobrasage . . . . .	13
3. Thermo hydrodynamique avec vaporisation - décontamination laser - SLM . . . . .	17
a) Ablation . . . . .	19
b) Fabrication additive par lit de poudre . . . . .	23
c) Limites et perspectives . . . . .	27
4. Études supplémentaires/complémentaires . . . . .	28
5. Validations expérimentales - moyens de mesure . . . . .	30
a) Mesure de forme . . . . .	30
b) Mesure de vitesses de jets de particules . . . . .	31
c) Mesure de température . . . . .	32
6. Conclusion partielle . . . . .	34
C- Mesure des propriétés thermophysiques de métaux fondus . . . . .	35
1. Introduction et démarche globale . . . . .	35
2. Tension de surface . . . . .	36
a) Méthode de la goutte posée . . . . .	36
b) Méthode de la lévitation aérodynamique . . . . .	38
c) Méthode de la lévitation acoustique . . . . .	40
3. Masse volumique . . . . .	41
4. Autres propriétés et conclusion partielle . . . . .	42
D- Conclusion . . . . .	43
<b>II "Activités d'enseignement"</b>	<b>45</b>
A- La gestion de matières, modules et formations . . . . .	45
1. Option Chaudronnerie (300heqTD) . . . . .	45
2. Filière Mise en Forme - semestre plus stage . . . . .	45
3. Formation "Projet" - OPM et CE . . . . .	46

B-	Construction ou reprise d'unités d'enseignements . . . . .	46
C-	Bilan enseignements . . . . .	48
<b>III "Collaborations Académiques et Industrielles, Financements publics, Responsabilités scientifiques"</b>		<b>49</b>
A-	Collaborations . . . . .	49
1.	Contrats directs (Collaborations industrielles) : . . . . .	49
2.	Contrats d'accompagnements de thèses cifre (Collaborations industrielles et académiques) : . . . . .	50
B-	Financements publics . . . . .	50
C-	Responsabilités scientifiques . . . . .	51
<b>Conclusions et perspectives</b>		<b>53</b>
A-	Aspect recherche . . . . .	54
1.	Court terme (en partie en cours) – résolu dans les 3 ou 4 ans . . . . .	54
2.	Moyen terme – démarré dans les 3 ou 4 ans . . . . .	56
3.	Long terme plus de 4 ans . . . . .	58
B-	Aspect managérial . . . . .	59
C-	Start up – labo . . . . .	59
D-	Aspect pédagogique . . . . .	60
<b>A Curriculum Vitae</b>		<b>62</b>
<b>B Publications et communications</b>		<b>66</b>



# Chapitre "Activités de Recherche"

---

## A- Résumé des activités de recherche

*Les activités de recherche résumées ici portent principalement sur la simulation numérique des procédés lasers pour différentes applications. L'échelle d'analyse est dite mésoscopique, les physiques traitées sont donc de dimensions intermédiaires, c'est à dire, entre la dimension microscopique généralement corrélée à la métallurgie et la dimension macroscopique de la mécanique du solide. Les analyses présentées par la suite sont donc globalement thermo-hydrodynamiques appliquées à des procédés plutôt de type laser continu. L'intérêt étant que, pour ces procédés "thermiques" et les matériaux considérés, les transferts de chaleur sont à l'origine de l'ensemble des effets résiduels.*

*La démarche scientifique proposée ici est de maîtriser la physique de l'interaction laser – matière, la physique des matériaux ainsi que la simulation numérique afin d'améliorer la compréhension d'un procédé ou d'en optimiser son utilisation. Cela, en allant de la définition des modèles physiques les plus adaptés aux lasers à la validation expérimentale des résultats en passant par la mesure des paramètres physiques les plus sensibles. Nous parlerons donc du triptyque « simulation, validation et mesure de propriétés » qui paraît essentiel dans une démarche cohérente de simulation.*

### **Simulation numérique multiphysique des procédés lasers**

#### **Modèles physiques, méthodes numériques**

*Les simulations numériques associées aux procédés lasers ont la particularité de faire intervenir des physiques particulièrement dynamiques et de hautes intensités. Les flux lasers dans les applications que nous avons traitées telles que le micro-soudage, la fabrication additive ou l'ablation laser, sont globalement assez intenses, autour ou supérieures au  $MW.cm^{-2}$ , et font intervenir des gradients importants et donc, généralement des difficultés numériques. De plus, les lasers appliqués aux métaux font apparaître le matériau sous différentes phases, solide, liquide, vapeur et parfois même sous forme de poudre ou d'oxyde. Nous avons donc travaillé à identifier les méthodes numériques les plus pertinentes, (formulation Eulerienne ou Lagrangienne de l'interface pour la gestion de problèmes multiphasiques) ainsi qu'à proposer les modèles physiques et les hypothèses associées, les plus adaptés aux cas étudiés. Nous avons pris un soin particulier à identifier les phénomènes physiques clefs (vaporisation, oxydation, tension de surface, absorption laser volumique, . . . ) et de les intégrer aux modèles pour arriver à proposer, autant que faire se peut, des simulations les plus prédictives. Les applications précises présentées dans le manuscrit portent sur le soudage, la fabrication additive, l'ablation laser et la combustion des métaux.*

### **Validation expérimentale**

Dans ce contexte, les simulations ne sont pas toujours triviales et par conséquent la validation des modèles non plus. La validation d'une simulation de procédé se fait toujours par comparaison à des résultats expérimentaux, les études analytiques étant assez rares car trop complexes. Cependant, en application laser les informations sont difficilement accessibles, i.e. les températures d'intérêt sont élevées (entre 2000 K et 4000 K, les vitesses aussi (entre  $1 \text{ m.s}^{-1}$  et  $500 \text{ m.s}^{-1}$ ). Par conséquent, des moyens de mesure "rapides" et sans contact, anciens et nouveaux, ont été adaptés et développés pour cette démarche particulière.

### **Mesure de propriétés thermophysiques à haute température**

Une simulation de procédé très complète physiquement peut malgré tout présenter des écarts importants avec la réalité expérimentale. Notre observation est que les propriétés des matériaux présentent aujourd'hui le plus d'incertitude. Provenant en général de la littérature elles sont parfois faciles à obtenir, dans la phase solide par exemple, et parfois bien plus difficiles à trouver, dans le liquide. Pour cette raison une action de recherche est menée sur la mesure de ces propriétés des métaux au delà de leur point de fusion. Cette démarche vient donc en soutien à la simulation. L'approche globale vise à mesurer, en fonction de la température, les propriétés thermiques telles que la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur massique à pression constante et les propriétés fluides que sont la viscosité et la tension de surface. Les travaux menés jusqu'à maintenant ont permis de déterminer la moitié de ces inconnues (tension de surface, densité et viscosité) en fonction de la température.



## B- Simulation numérique des procédés lasers et validation



### Contexte

Le laboratoire PIMM possède une équipe (DYSCO) en partie orientée vers les développements de simulations numériques et notamment à l'origine de la méthode de résolution d'équations différentielles C-NEM<sup>a</sup>. Cependant, si les actions de simulation des procédés lasers existaient déjà, notamment par les thèses de M. Defauchy et M. Girardot (soutenus respectivement en 2013 sur la fabrication additive polymère et 2014 sur le perçage laser), mon recrutement en 2012 visait un renforcement et une pérennisation de cette thématique dans l'équipe Laser. Aujourd'hui, elle fait partie d'une des quatre actions phares du laboratoire "Approche intégrée en multiphysique" que nous co-animons M. Monteiro (groupe DYSCO) et moi-même. Les développements de méthodes numériques étant le savoir faire de l'équipe DYSCO, mon positionnement est intermédiaire (utilisation de code commerciaux) et plutôt multiphysique.

La recherche sur ce sujet passe actuellement par des contrats doctoraux en partie sous mon encadrement. Quatre thèses sont actuellement en cours dans l'équipe sur ce sujet, deux sont terminées (Mme Abouda 2018 et Mme Gunenthiram 2018) et deux ont été réalisées à l'extérieur du laboratoire mais avec une action numérique également sous ma responsabilité (Mme Gouton 2015 et Mme Carvalho 2018).

a. J. Yvonnet, D. Ryckelynck, P. Lorong, F. Chinesta, A new extension of the natural element method for non-convex and discontinuous problems : the constrained natural element method (C-NEM), International Journal for Numerical Engineering (8), Volume 60, 2004, 1451-1474

### Introduction

Quel que soit le procédé, les physiques mises en jeu durant les applications lasers dites continues ou faiblement pulsées (temps d'interaction supérieur à la nanoseconde) restent globalement les mêmes. Le laser est utilisé comme source de chaleur pour fondre et/ou vaporiser localement une pièce. Une fois le "bain fondu" créé, il peut être mélangé à celui d'une autre pièce produisant une soudure après refroidissement. Il peut être éjecté conduisant à la découpe ou au perçage. Enfin, il peut servir de "micro-creuset" recevant une matière extérieure et créant ainsi la fabrication additive ou impression 3D.

En simulation numérique, les phénomènes sont regroupés par "physiques" et globalement représentés par diverses équations de conservation<sup>1</sup>. Pour commencer, le faisceau laser peut être représenté de manière ondulatoire par la résolution des équations de Maxwell ou de manière corpusculaire par les techniques de ray-tracing (lancé de rayon). Les transferts thermiques dans la pièce seront déterminés par la résolution de l'équation de la chaleur souvent couplée à la conservation de la masse et de la quantité de mouvement (Navier-Stokes). Dans certains cas, la concentration d'un ou de plusieurs éléments sera suivie par la résolution de l'équation de Fick (conservation des espèces chimiques). Pour finir, après avoir, si besoin, évalué les phases métallurgiques en présence, les effets mécaniques seront déterminés en appliquant la conservation de la contrainte.

1. M. Dal, R. Fabbro, An overview of the state of art in laser welding simulation, Journal Optics & Laser Technology (78), 2016, 2-14



Notons qu'à cela s'ajoute la gestion numérique des frontières libres (liquide-gaz) qui est d'un enjeu premier dans ce type d'étude.

Dans les travaux présentés par la suite, les finalités sont la compréhension et l'optimisation du procédé. Il s'agira dans certains de déterminer une simple largeur de zone fondue et dans d'autres de visualiser une instabilité hydrodynamique. Pour cette raison, l'ensemble des physiques énoncées précédemment ne sont pas toujours traitées et afin de présenter clairement la démarche globale de mon travail de recherche, les phénomènes physiques seront présentés avec des applications réelles et ce, de manière croissante en terme de complexité.

## 1. Problème thermique - Projection de poudre simplifiée

Une étude thermique seule revient à ne traiter que l'équation de la chaleur et ce, sans transport :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T \quad (\text{I.1})$$

Ce cas, pour une application laser, est assez rare car le liquide, donc la mécanique des fluides, joue généralement un rôle important. Néanmoins, ce type d'étude peut se présenter dans deux cas :

- lors de la simulation d'un traitement thermique sans fusion (adoucissement, trempe, ...),
- lors de la simulation volontairement "simplifiée" d'une application donnée.

Le premier n'implique pas de difficulté particulières (thermiquement). Nous nous concentrerons donc sur le second pour lequel les hypothèses sont primordiales. L'exemple appliqué à la fabrication additive, présenté par la suite, illustre cette démarche. Notons que cette approche n'est souvent qu'une étape d'une étude plus globale (thermo-métallurgique ou thermo-mécanique) pour laquelle un couplage fort est difficile à mettre en place. En l'occurrence, l'étude vise à déterminer les phases métallurgiques en présence après fabrication d'une pièce en titane.

### Problématique et procédé :

Le procédé de fabrication additive dit par projection de poudre est une des méthodes d'impression 3D de métaux. Comme l'illustre la figure I.1<sup>2</sup>, le principe est basé sur le chauffage laser d'un substrat (ou d'une couche précédente) créant ainsi une zone fondue (ZF) dans laquelle est injectée de la poudre métallique. La chaleur du liquide va permettre la fusion de la poudre par contact et ainsi, après solidification, former un dépôt continu de matière. La pièce finale sera donc obtenue par superposition de cordons unitaires.

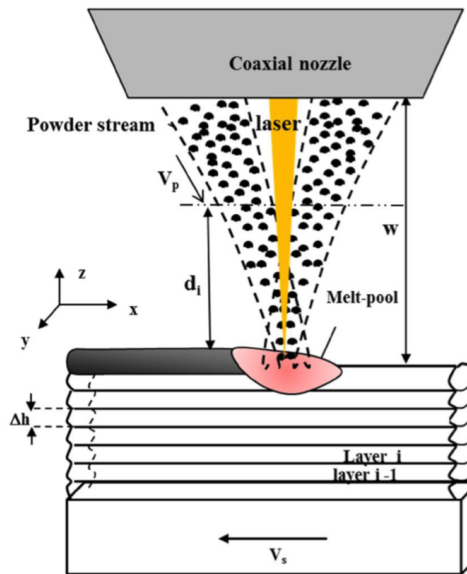
Le jet de poudre est obtenu par assemblage de plusieurs jets gazeux, dont un est porteur de poudre. La buse de projection a donc deux objectifs, protéger de l'oxydation la zone de fabrication et apporter la matière. Même si l'influence de cette partie amont du procédé est essentielle, rappelons que dans cette première étape, seule la thermique sera simulée. Nous reviendrons sur cette partie par la suite (Simulation de la projection de poudre - thèse Elise Ferreira).

La pièce subit donc, par construction, de nombreux cycles thermiques ayant potentiellement un effet im-

---

2. M. Gharbi, P. Peyre, C. Gorny, M. Carin, S. Morville, P. Le Masson, D. Carron, R. Fabbro, Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti-6Al-4V alloy, Journal of Materials Processing Technology 5 (213), 2013, 791-800





**FIGURE I.1:** Schéma de principe de la fabrication additive par projection de poudre

portant sur la microstructure du matériau (sur acier et titane par exemple) qu'il peut être nécessaire d'identifier et d'anticiper. Alors, un traitement thermique peut par exemple être associé.

#### Objectifs :

Dans cette version simplifiée de la simulation de ce procédé, les objectifs sont les suivants :

- calculer le champ de température dans la pièce,
- intégrer simplement la notion de dépôt de matière.

#### Modèle et application :

Les deux difficultés principales de cette étude simplifiée sont :

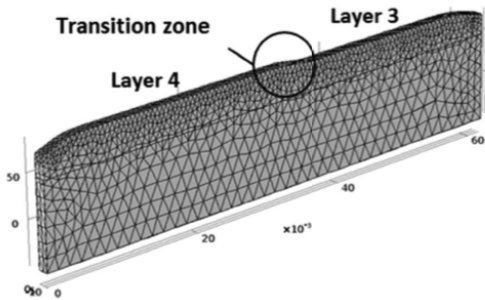
- l'intégration de l'effet de la convection dans le champs de température,
- la gestion de l'apport de matière.

Dans ce type d'application, les effets convectifs sont généralement traités et calculés. Il est aussi possible de ne pas les négliger totalement, par l'ajout d'une conductivité thermique artificielle maximisée dans la direction d'avance du procédé et ce, lorsque la température est supérieure au point de fusion. En effet, le fluide allant majoritairement vers l'arrière du procédé, il tend à emporter la chaleur et donc à maximiser les transferts dans cette direction. L'augmentation artificielle de cette conductivité peut être d'un facteur 1 à 100. La vitesse du liquide étant très dépendante du procédé et du matériau le coefficient multiplicateur est difficile à anticiper et est souvent identifié par comparaison des longueurs de zone fondues numériques et expérimentales (ici la conductivité est multipliée par 4).

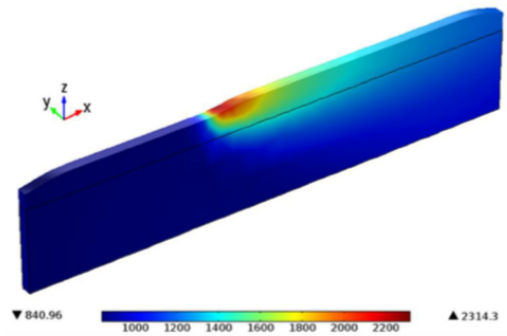
Pour ce qui est de l'ajout de matière, une méthode bien connue consiste à "activer" des éléments au fur et à mesure de l'avancée du procédé. Pour éviter les discontinuités liées à cette "apparition" de matière, une méthode tout aussi simple mais qui semble plus efficace peut être mise en place. Elle est basée sur un outils que

l'on retrouve en gestion de frontière libre (liquide), la méthode Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)<sup>3</sup>. Issue des méthodes de maillages mobiles, elle repose sur une description Lagrangienne d'une frontière libre et Eulerienne de l'écoulement dans le volume. En d'autres termes, le déplacement de la frontière est calculé physiquement alors que la déformation des éléments de volume est déterminé arbitrairement (souvent de manière à optimiser la qualité des mailles). Cette déformation est bien sûr prise en compte dans le calcul du champ de vitesse.

Dans le cas présent<sup>4</sup>, le fluide n'est pas traité est cette méthode est utilisée pour ajouter la matière dans la zone théoriquement liquide, s'accumulant avec le temps et formant ainsi les couches de matière. Comme l'illustre la figure I.2, la taille du domaine est augmentée par étirement des mailles selon l'axe z à chaque couche.



**FIGURE I.2:** Schéma de principe de l'apport de matière par la méthode ALE.

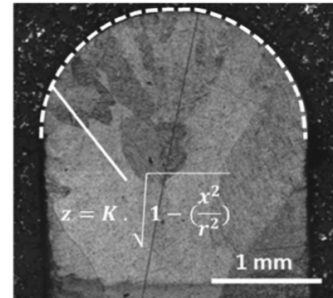


**FIGURE I.3:** Champs de température à la quatrième couche.

Notons que la méthode ALE dans ce cas ne conserve pas la masse, rendant possible, d'un point de vue thermique, cet apport de matière. Le champ de température peut donc être calculé couche après couche (figure I.3).

$$V_{z,0} = \frac{D_m}{\pi r_p^2 \rho_p}$$

$$V_z = V_{z,0} \sqrt{1 - \left( \frac{x^2}{r_p^2} + \frac{y^2}{r_p^2} \right)}$$



**FIGURE I.4:** Coupe transverse d'un dépôt.

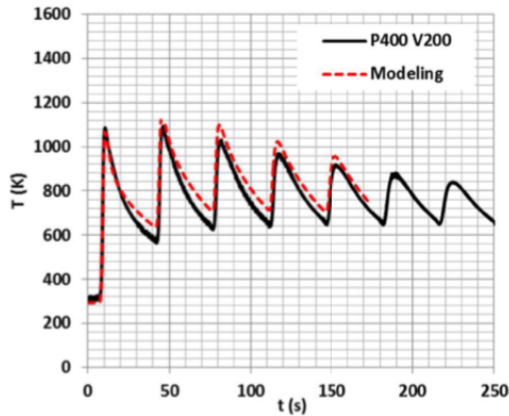
Si dans le cas d'une simulation thermo-hydrodynamique, la forme du dépôt de matière est obtenue physiquement, dans le cas présent un soin particulier est à appliquer à la vitesse de déformation de la frontière supérieure (figure I.2). Compte tenu des résultats expérimentaux (figure I.4), le profil de vitesse est considéré elliptique<sup>4</sup>.

Les résultats en température (figures I.5 et I.6) obtenus dans cette configuration sont alors suffisamment représentatifs de la réalité pour prédire la forme des grains grâce à une carte de microstructure (gradient =

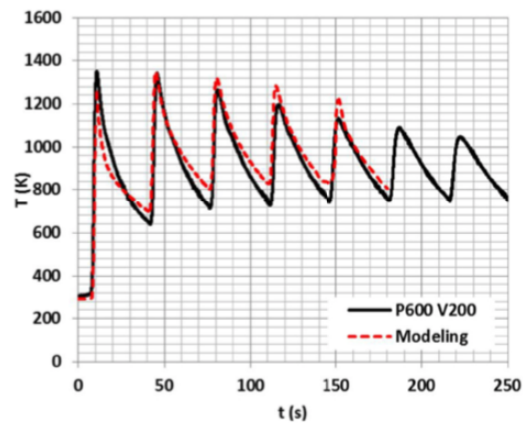
3. Hirt C.W., An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing technique, Proceedings of the Second International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics (1971) volume 8.

4. P. Peyre, M. Dal, S. Pouzet, O. Castelnau, Simplified numerical model for the laser metal deposition additive manufacturing process, Journal of Laser Applications 29, (2017) 022304

f(vitesse de solidification)).



**FIGURE I.5:** Cinétique de température dans la pièce - configuration 1.



**FIGURE I.6:** Cinétique de température dans la pièce - configuration 2.

### Limites et conclusion :

Malgré les résultats satisfaisants de cette étude, la méthode proposée reste soumise à quelques limites.

Premièrement, l'identification de la forme elliptique du dépôt de matière et le choix de la conductivité thermique artificielle demandent des essais préalables réduisant le caractère prédictif du modèle.

Deuxièmement, la méthode numérique utilisée pour simuler l'apport de matière (ALE) est à nombre de noeuds fixe (par défaut). Le nombre de couches simulables est donc limité (environ une dizaine). Néanmoins, le maillage peut être optimisé pour anticiper cette déformation ou une procédure de remaillage peut aussi être mise en place.

Troisièmement, la simplicité de la simulation a un réel intérêt notamment pour un utilisation industrielle, néanmoins les prévisions présentent une incertitude relativement importante.

Compte tenu de ces limites, il peut être utile d'ajouter la résolution de la mécanique des fluides.

## 2. Problème thermo-hydrodynamique sans vaporisation - Soudobrasage

Une résolution thermo-hydrodynamique revient à ajouter la mécanique des fluides à une étude thermique. Les équations de conservation à résoudre sont donc maintenant :

- L'équation de la chaleur (avec transport) :

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot \lambda \nabla T \quad (\text{I.2})$$

- Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (\text{I.3})$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = \nabla \cdot \left( p \mathbf{I} + \mu \left( \nabla v + \nabla v^T \right) \right) + \rho g + K v \quad (\text{I.4})$$

Notons que l'interaction entre la thermique et la mécanique des fluides se fait par le terme de transport

dans l'équation de la chaleur et par les dépendances des propriétés fluides ( $\rho(T)$  et  $\mu(T)$ ) avec la température. Précisons aussi que le dernier terme de l'équation de Navier-Stokes (I.4) est la condition de Darcy <sup>5</sup> (écoulement en milieux poreux) usuellement utilisée pour traiter l'arrêt de l'écoulement dans le solide.

L'ajout de la mécanique des fluides permet de traiter un plus grand nombre d'applications lasers telles que le soudage, la fabrication additive ou encore la refusion de surface. Néanmoins, avec la prise en compte du liquide, les problèmes de frontières libres apparaissent (tension de surface, pression de vaporisation, éjections de liquide). Pour simplifier la discussion, dans cette partie, les problèmes de vaporisation ne seront pas présentés mais apparaîtront dans l'Etape 3.

Les procédés lasers ne faisant pas intervenir de vaporisation peuvent être par exemple, du soudage en mode "conduction" <sup>6</sup> ou encore la fabrication additive par projection de poudre.

Pour illustrer ce type de modèle, nous nous appuyerons sur une étude de soudobrasage dans laquelle une simulation thermo-hydrodynamique a été développée pour alimenter en température un modèle de diffusion d'espèce chimique.


Le soudo-brasage est un procédé dont l'intérêt majeur est l'assemblage de matériaux de nature différente. L'exemple qui a été traité ici concerne le couple aluminium - titane rencontré en général dans le secteur de l'aéronautique et au centre du projet Carnot *ATILA* en collaboration avec l'Institut Carnot de Bourgogne (ICB).

#### Problématique et procédé :

Ce procédé, à l'intersection du soudage et du brasage, permet d'assembler des matériaux généralement difficiles à souder de manière conventionnelle. Dans le cas présent, le titane et l'aluminium ont tendance à former, par inter-diffusion, des composés intermétalliques stables, à haute température ( $TiAl$ ,  $TiAl_3$  ou  $Ti_3Al$ ). Certains étant sous forme de céramiques, ils peuvent fragiliser l'assemblage. Afin de bien maîtriser la quantité d'intermétallique formée, la configuration d'assemblage retenue est dite à clin (figure I.7), i.e. en recouvrement, avec l'aluminium fondu sur le titane solide. L'interface entre les deux matériaux devient donc un plan et l'intermétallique, une couche dont l'épaisseur varie avec les paramètres procédés (figure I.8). Notons que dans cette configuration la couche de diffusion sert à l'assemblage des deux pièces et son épaisseur devient un critère important pour la tenue mécanique globale.

#### Objectifs :

- prédire l'épaisseur de la couche d'intermétallique (ici  $TiAl_3$ ) (calcul de diffusion d'espèce chimique réalisé *a posteriori*)
- prédire la surface de contact

 **Note** Les analyses de la tenue mécanique des assemblages ont été réalisés par P. Peyre <sup>7</sup> et ne seront pas présentés ici.

5. P.C. Carman, Fluid Flow through granular beds, Trans Institution of Chemical Engineers Jubilee Supplement (75) 1997, 32-48

6. R. Fabbro, Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding, Journal of Physics D : Applied Physics (43) 2010, 445501

7. P. Peyre, L. Berthe, M. Dal, S. Pouzet, P. Sallamand, I. Tomashchuk, Generation and characterization of T40/A5754 interfaces with lasers, Journal of Materials Processing Technology 9, Volume 214, 1946-1953

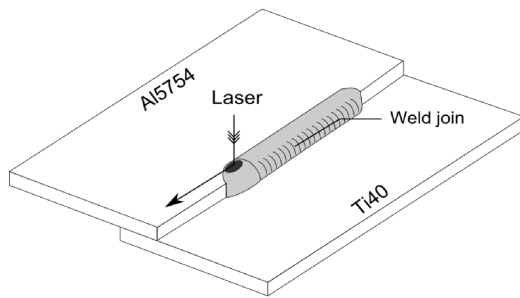


FIGURE I.7: Schéma du soudo-brasage à clin.

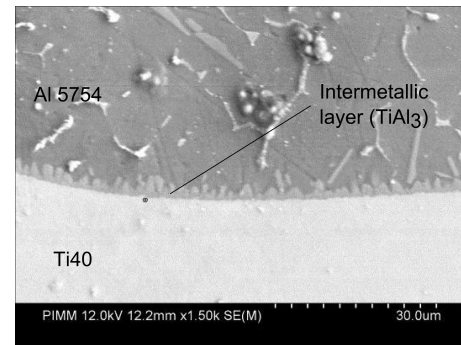


FIGURE I.8: Micrographie MEB d'une couche d'intermétallique  $TiAl_3$ .

### Modèle et application :

Dans cette étude, la diffusion est traitée dans un second temps en raison du facteur d'échelle entre les pièces à assembler (10 cm) et l'épaisseur d'intermétallique à déterminer (1  $\mu m$ ). Elle imposerait dans notre cas, un maillage trop fin à l'interface, nous avons donc préféré un découplage entre le problème thermo-hydrodynamique et le transport d'espèces. En d'autres termes, l'effet de la formation de  $TiAl_3$  sur les transferts thermiques est considéré comme constant (barrière de diffusion). De plus, comme la diffusion se produit à l'interface dans la direction du gradient de concentration, elle est considérée monodimensionnelle dans la direction normale à cette même interface.

La première étape de l'étude a été un développement bidimensionnel axisymétrique (figure I.9). Elle vise à valider les phénomènes physiques à intégrer dans le futur modèle tridimensionnel.

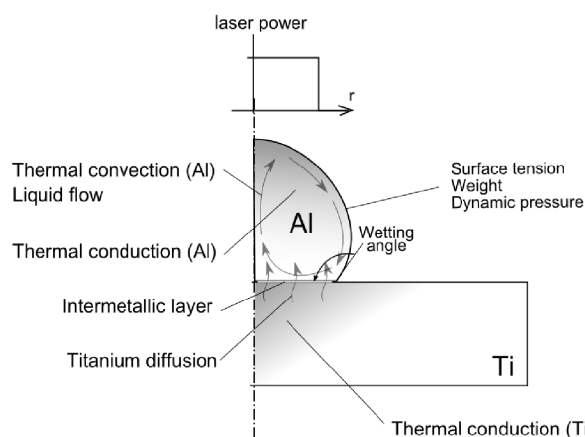


FIGURE I.9: Schéma du soudobrasage 2D axisymétrique

Ce modèle de fusion d'un cylindre d'aluminium sur titane est réalisé en considérant des propriétés thermophysiques et fluides dépendantes de la température et issues de la littérature<sup>8</sup>. L'aluminium se dilate expérimentalement de manière sensible lors du chauffage mais les vitesses de liquide restant faibles, le milieu

8. M. Dal, P. Peyre, (Special issues) Multiphysics Simulation and Experimental Validation of Aluminum Wettability on a Titanium Substrate for Laser Welding-Brazing Process, *Metals* 7, (218) 2017, 1-14

est considéré comme faiblement compressible.

Une particularité de ce travail concerne la gestion de la frontière libre (domaine aluminium - figure I.9) qui varie au cours du temps, en fonction de la température et du champ de vitesse (figure I.10). Physiquement, la forme de la goutte dépend de l'équilibre entre son poids, sa tension de surface (pression de Laplace), de la pression hydrodynamique en surface et de la qualité du mouillage.

Comme l'illustre la figure I.10 le mouillage de l'aluminium sur le titane est fortement dépendant de la température de contact. La gestion numérique de la déformation est là aussi réalisée par la méthode ALE et la forme de la frontière libre (domaine aluminium) est obtenue à partir de l'équilibre des pressions. Associée à cela, la résolution de l'équation de continuité (eq. I.3) permet la conservation de la masse. L'angle de mouillage, variable avec la température, est issu de la littérature est imposé par l'intermédiaire d'une "force de mouillage" appliquée au point triple <sup>9</sup>.

Après validation du bon comportement thermo-hydrodynamique du modèle (figure I.10)<sup>8</sup>, et vérification de l'homogénéité de la température de contact, le calcul de diffusion monodimensionnel est effectué à partir du champ de température précédemment calculé. Finalement, l'épaisseur de formation de  $TiAl_3$  calculée est de l'ordre de  $2 \mu m$  correspondant bien à l'intervalle de  $[1.4-2.2] \mu m$  obtenu expérimentalement <sup>7</sup>.

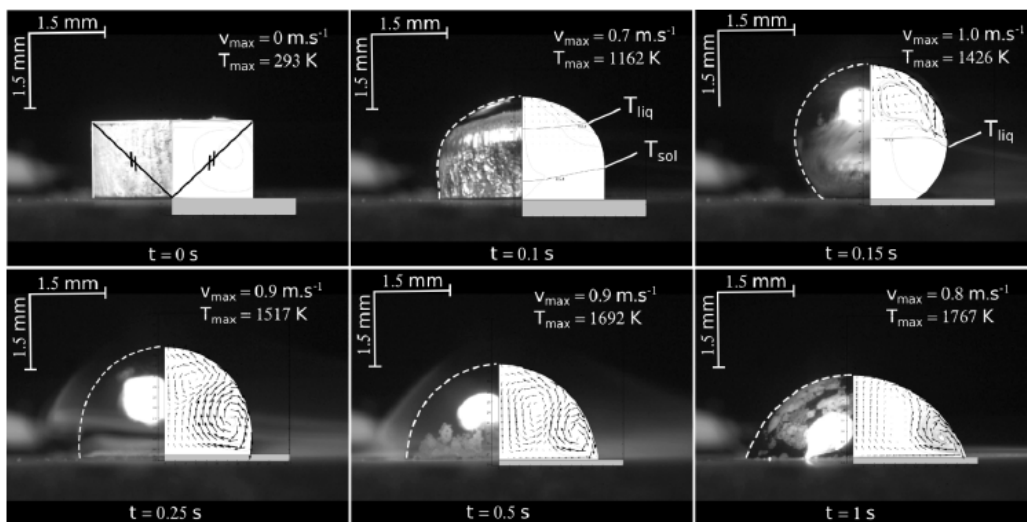


FIGURE I.10: Résultats de la simulation 2D axisymétrique, partie gauche : expérimental, partie droite : simulation

Les mêmes phénomènes physiques et paramètres numériques ont été ensuite intégrés à une géométrie 3D représentative de l'expérience (figure I.11).

Les résultats présentés sur la figure I.12 illustrent le champ de température, de vitesse et la déformation en régime quasi-stationnaire (repère de la source). Sur la partie b) de cette figure, les isosurfaces indiquent la zone fondue ainsi que la zone de diffusion obtenue à un instant donné. Notons que maximiser la largeur de diffusion, augmentera la surface de création d'intermétallique et donc la tenue mécanique de l'assemblage. Les résultats de cet exemple sont présentés dans la table I.1.

9. O. Dezellus, Contribution à l'étude des mécanismes de mouillage réactif, Ph.D. thesis 2000, Institut National Polytechnique de Grenoble, France



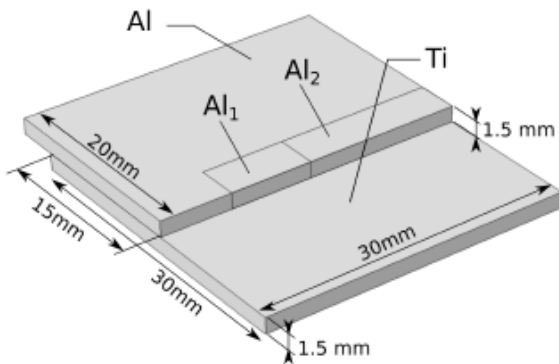


FIGURE I.11: Domaines simulés.

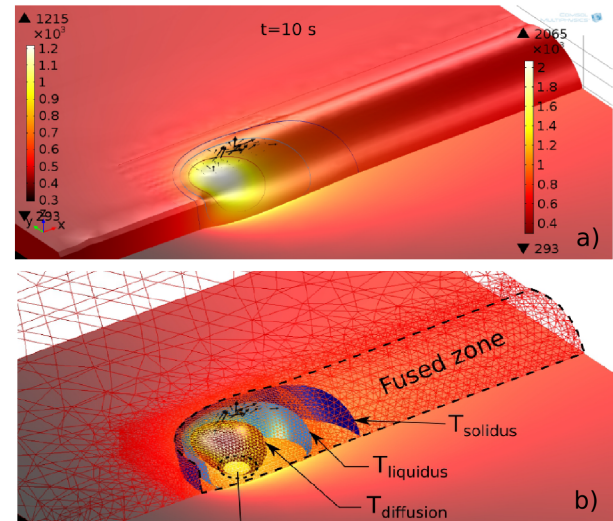


FIGURE I.12: Résultats simulation 3D - a) champs de température de surface, b) mesure de surface de diffusion.

	Simulation	Expérience
largeur de fusion (mm)	4,6	<b>5,0</b>
largeur de diffusion (mm)	1,2	<b>1,3</b>
angle de contact (°)	65	<b>59,6</b>

TABLE I.1: Comparaison numérique expérimentale soudo-brasage Ti-Al

Limites et conclusion :

A l'issue de cette étude, deux simulations ont été validées, l'une 2D axisymétrique avec détermination et validation de l'épaisseur de couche intermétallique, l'autre 3D, avec comme résultats supplémentaires, les largeurs de mouillage et de diffusion.

Rappelons que ces simulations ne présentent pas de couplage fort entre la thermo-hydrodynamique et la diffusion. De plus, en raison du facteur d'échelle important entre les physiques, la cartographie de la concentration d'espèces à l'interface est obtenue par une multitude de simulations monodimensionnelles.

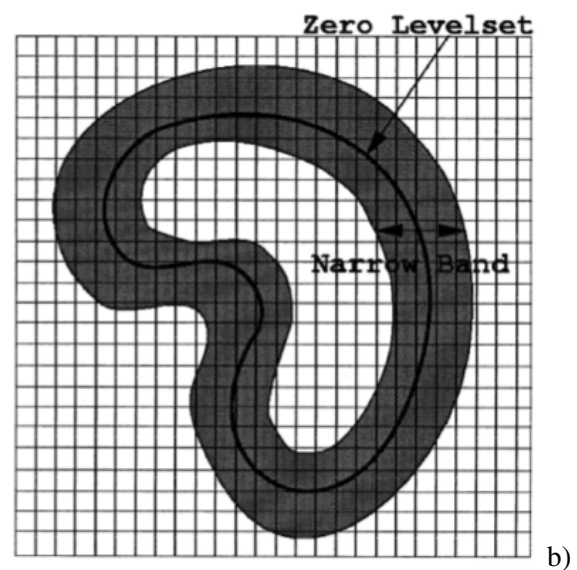
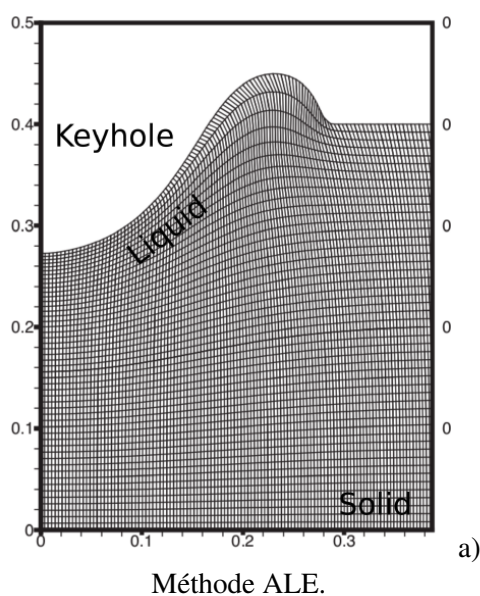
Si cette étude à aujourd'hui pris fin, le travail mené et les développements numériques restent d'actualité pour des études actuelles (mesure de viscosité) et futures (mesure d'angle de mouillage et diffusion - contrat direct avec Arcelor en cours de discussion sur le brasage).

### 3. Thermo hydrodynamique avec vaporisation - décontamination laser - SLM

En régime impulsif ou lorsque le faisceau est fortement focalisé, les procédés lasers ont la particularité de présenter des densités de puissance très importantes, positionnant le procédé en régime dit d'ablation ou à fort niveau d'évaporation. Cette configuration est beaucoup plus présente dans l'industrie et les applications concernées sont par exemple, le perçage, l'ablation, le soudage ou la fabrication additive (lit de poudre).



Si les équations de conservations sont les mêmes que dans l'**Etape 2**, la vaporisation intervient à l'interface liquide/vapeur. Numériquement, cette interface peut être de différentes formes, en fonction de la méthode de traitement utilisée. Dans les exemples présentés par la suite, la formulation ALE a été utilisée (figure I.13-a). En effet, les autres méthodes utilisables (Phase Field et Level Set) dites Euleriennes (figure I.13-b) ont la particularité de traiter l'interface de manière continue à travers le maillage (fonction distance<sup>1</sup>), facilitant la simulation de fortes déformations mais réduisant la représentativité du modèle sur l'interface. Par exemple, dans Comsol Multiphysics© l'interface est une fonction variant entre 0 et 1 (ou -1 et 1) sur une certaine épaisseur, paramétrable. La source du problème thermique (le laser) généralement imposée de manière surfacique (pour les métaux) sera donc distribuée sur cette même épaisseur, arbitraire. Il en va de même pour les effets mécaniques interfaciaux (tension de surface, effet Marangoni, pression de recul) qui sont eux aussi d'importance première dans ce type d'étude. Pour ces raisons, ces méthodes ne sont pas retenues pour le moment.



**FIGURE I.13:** Exemple de méthode numérique pour la représentation de frontière libre

### Phénomène de vaporisation :

La forte vaporisation observée lors d'applications lasers est à l'origine d'effets thermiques et mécaniques particuliers à intégrer dans une simulation.

Interviendront :

- Le **flux de "chaleur latente" consommée à l'interface** pour le changement de phase  $\varphi_{evap}$ , non négligeable, il permet "naturellement" une stabilisation de la température maximale proche de la température de vaporisation. Il dépend directement du débit de masse évaporée  $q_m$  lui-même étant une fonction de la température, de la pression de vapeur saturante  $p_{sat}$  et de la recondensation potentielle ( $\beta_r$ ) de la vapeur dans la couche de Knudsen (rétrodiffusion) :

$$\varphi_{evap} = q_m L_{vap}$$



$$q_m = p_{sat} T \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} (1 - \beta_r)$$

$$p_{sat} = p_0 \exp\left(\frac{ML_v}{R} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

- La **pression de recul** s'exerçant à la surface du liquide se vaporisant est à l'origine de sa déformation apparaissant en soudage (Keyhole) ou perçage laser. Cette pression est générée par le transfert de quantité de mouvement de la vapeur sur l'interface qu'elle quitte (principe d'action réaction).

$$p_{rec} = p_{sat} \frac{1 + \beta_r}{2}$$

- La **vitesse d'éjection du gaz**. Le gaz quitte la frontière liquide / vapeur avec une vitesse importante. Cette dernière pouvant être déterminée et appliquée numériquement en conservant la quantité de mouvement à l'interface.

Deux études sont présentées ici ; l'une sur l'ablation et l'autre sur la fabrication additive. Elles ont été menées en collaboration directe avec le cea et safran respectivement.

- **Ablation - Désoxydation** - thèse L. Carvalho (soutenue en 2018) : L'application est nucléaire, il s'agit d'une nouvelle méthode de décontamination laser nanoseconde de matériaux métalliques. La contamination des métaux étant essentiellement dans la couche d'oxyde naturelle (micro ou nanométrique), il s'agissait ici de valider expérimentalement la faisabilité de la technique (cea) et d'étudier le processus de retrait de matière à son origine.
- **Fabrication additive par fusion de lit de poudre** - thèse Y. Mayi (en cours) : L'application ici est plutôt aéronautique (cifre Safran) et il s'agit ici de proposer un modèle multiphysique à l'échelle mésoscopique (taille du bain fondu) du comportement du matériau sous ses différentes formes, i.e. solide, liquide, gazeux et pulvérulent. La particularité étant que la poudre est traitée en tant que matériau continu à propriétés équivalentes. t

Dans les deux cas, les phénomènes physiques sont assez similaires mais sur des temps caractéristiques d'interaction laser / matière quatre ordres de grandeur différents (0.1  $\mu s$  pour l'ablation et 1  $ms$  en fabrication additive). Notons aussi que dans les deux cas, les études sont couplées à des phénomènes complémentaires : la diffusion d'espèces chimiques pour l'ablation et le jet de vapeur et multiréflexions pour la fabrication additive.

## a) Ablation

### Problématique et procédé :

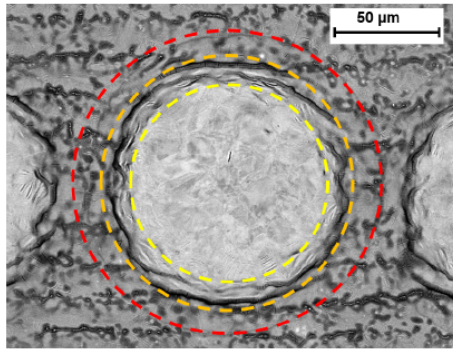
Dans cette étude, les développements expérimentaux réalisés au cea ont conduit à une validation de la méthode. La contamination résiduelle observée après traitement était évaluée à 0.2% néanmoins les mécanismes mis en jeu n'étaient pas parfaitement bien identifiés et plusieurs possibilités subsistaient :

- l'explosion de phase

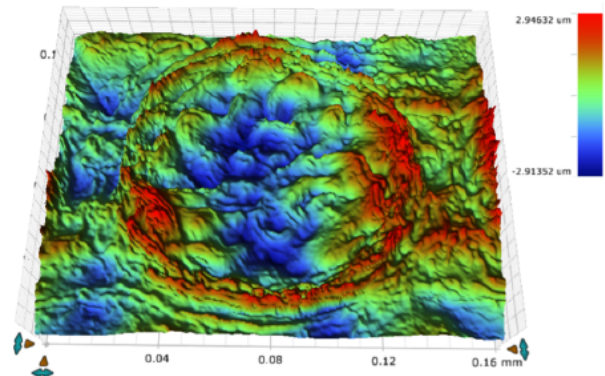


- la fracturation mécanique
- la vaporisation

Les illustrations de la figure I.14 représentent respectivement, un traitement laser sur oxyde sans recouvrement des impacts (a) et une analyse dimensionnelle de la déformation résiduelle après traitement (b) <sup>10</sup>.



a) Observation par MEB (BSE, 10 kV, 0,5 nA, Mg = 600).




b) Représentation 3D par microscopie interférométrique (Mg = 40).

**FIGURE I.14:** Exemple de résultats expérimentaux d'ablation sur couche d'oxyde

#### Objectifs :

Les objectifs de la part du numérique dans cette étude étaient :

- Développer une simulation thermo-hydrodynamique représentative de l'interaction laser - matière (métallique) en régime nanoseconde (cas matériau brute).
- Adapter la simulation précédente à l'oxyde et interpréter les résultats pour identifier la source du retrait de matière.

 **Note** Les travaux expérimentaux réalisés au cea ne sont présentés ici que succinctement. Toute information complémentaire sera accessible dans le manuscrit de la doctorante <sup>10</sup>.

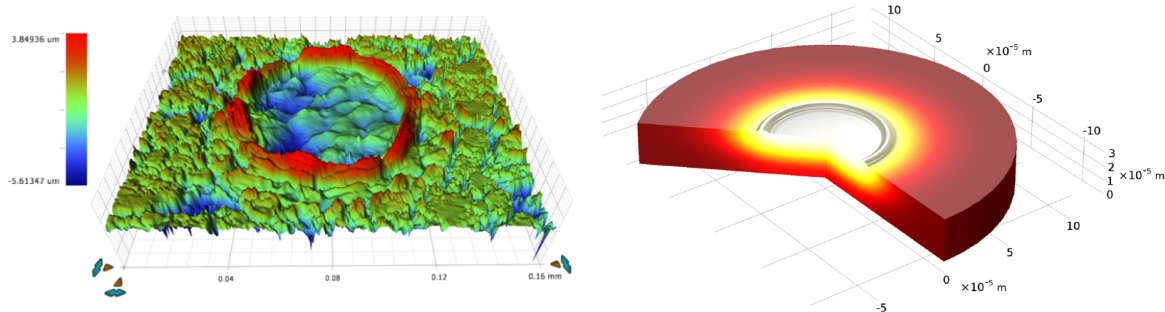
La démarche proposée a été de réduire le problème à un cas bidimensionnel (axisymétrique) représentant l'interaction durant une impulsion. Les problèmes thermiques, de mécanique des fluides ont été traités et de gestion de frontière libre ont été implémentés puis validés analytiquement et expérimentalement. Notons que dans ce cas, le facteur de forme de la zone ablatée étant très faible et les interactions gaz - liquide étant inexistantes, la simulation explicite de la vapeur ne présente pas d'intérêt particulier et sera donc réduite à son impact sur la pièce étudiée (pression de recul, chaleur latente de vaporisation, ...).

#### Modèles et applications :

Dans un premier temps, rappelons que l'ablation d'un matériau métallique sans oxyde a été simulée afin d'évaluer la représentativité de la simulation thermo-hydrodynamique. Pour valider cette simulation, des essais

<sup>10</sup>. L. Carvalho, Etude de l'interaction laser surface pour le développement de procédé de décontamination de surfaces métalliques avec fissures micrométriques par ablation laser, PhD Thesis, 2018

expérimentaux de mono-impacts ont été réalisés (au cea) montrant une bonne correspondance simulation - expérience<sup>10</sup>. Comme l'illustre la figure I.15, la simulation permet une représentation moyenne mais assez fidèle de la géométrie du "cratère" d'ablation (corolle de matière autour de l'impact).



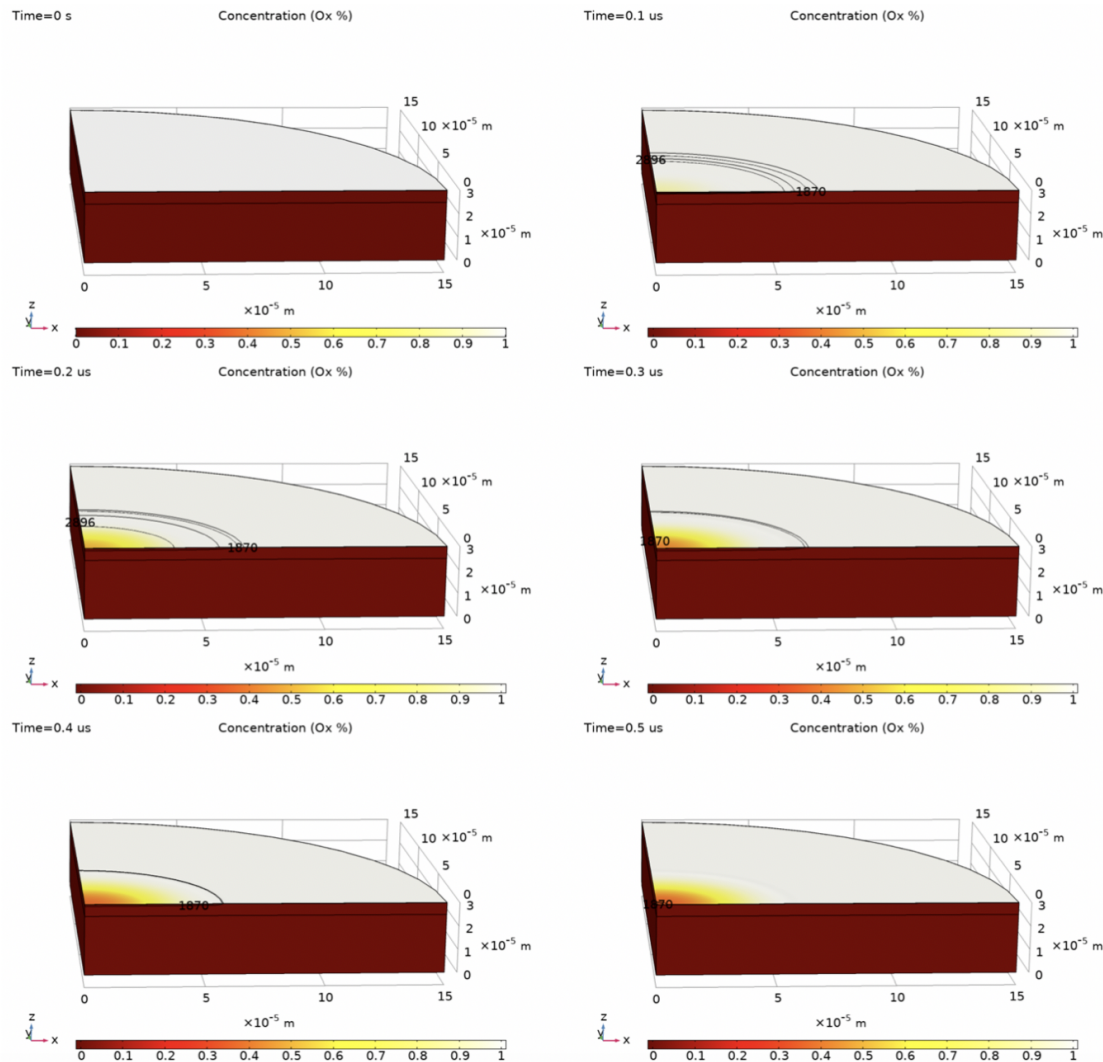
**FIGURE I.15:** Représentation 3D d'un cratère d'ablation à une fluence laser  $F_0 = 12,4 \text{ Jcm}^2$  obtenue par microscopie interférométrique (à gauche) et par simulation (à droite)

Notons que cette première étape numérique a permis d'améliorer notre compréhension de la formation de ce cratère. En effet, le procédé d'ablation étant proche du perçage, il paraît intuitif de penser que cet anneau de matière est similaire aux éjections de perçage et donc résultant de la déformation générée par la pression de recul. Or, dans le cas présent la pression de recul ne suffit pas à déformer d'autant le liquide. Cependant, il s'avère que, durant le refroidissement, le liquide mis en mouvement radial par la pression de vaporisation se heurte au front de solidification. Cette interaction réoriente le fluide vers le haut, formant ainsi les bords du cratère. Ce phénomène, extrêmement sensible, valide à lui seul le modèle et illustre l'intérêt d'une telle simulation au regard de la compréhension.

Dans un second temps, le précédent modèle est complété par l'ajout d'une couche d'oxyde de fer (environ 130 nm d'épaisseur) dont la concentration est suivie par la résolution de la conservation des espèces chimiques (loi de Fick<sup>11</sup>). Notons que, l'oxyde n'étant pas parfaitement opaque comme le métal, cette modification implique une absorption laser volumique.

La figure I.16 illustre la réduction de concentration d'oxyde au cours du temps pour un mono-impact. En comparant les concentrations de contaminant résiduelles calculées (0,28 %) et mesurées (0,20 %), le modèle paraît être suffisamment prédictif pour être utilisé dans l'analyse du mode de retrait de matière.

11. M. Dal, L. Carvalho, A. Semerok, W. Pacquentin, H. Maskrot, Simulation of bi-material nano-second laser ablation, Paper Number 268, COMSOL CONFERENCE 2019, Cambridge, October 24-26.



**FIGURE I.16:** Evolution de la concentration d'oxyde simulée

Mode de retrait de matière :

- l'explosion de phase : se produit lorsque le métal et l'oxyde sont liquides et que le métal se vaporise en premier. Or, les évolutions de température observées avec le modèle (figure I.17) montrent que l'oxyde fond et se vaporise avant la vaporisation du métal. De même la matière préférentiellement évaporée apparaît être l'oxyde. Cette hypothèse n'est donc pas valide.
- la fracturation mécanique : apparaît en phase solide, lorsque les deux matériaux (oxyde et métal) ont des dilatations différentielles trop importantes. Dans le cas présent, les images expérimentales (Figure I.14) des mono-impacts montrent clairement que les bords de la zone ablatée ont été fondus. Cette hypothèse n'est donc pas valide non plus.
- la vaporisation : considère que toute la matière (oxyde) ablatée est retirée sous forme de vapeur. Cette dernière hypothèse est la plus probable dans la mesure où aucun éjectat (solide ou liquide) n'est présent à la surface de la pièce et que le flux total de matière évaporé calculé est de l'ordre de grandeur de celui mesuré expérimentalement (respectivement 5,1 mg avec recouvrement contre 3,3 mg sans recouvrement, d'où le léger écart).

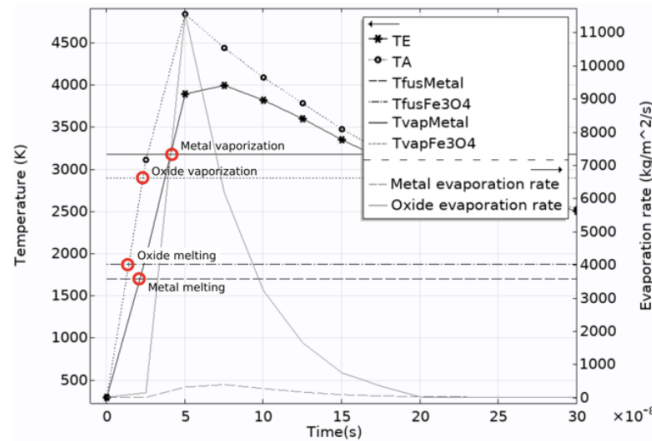


FIGURE I.17: Dynamique thermique et masse ablatée

## b) Fabrication additive par lit de poudre

### Problématique et procédé :

Le procédé de fabrication additive par lit de poudre (Laser Powder Bed Fusion ou Selective Layer Melting) est un procédé extrêmement prometteur mais souffrant encore de quelques lacunes (manque de répétabilité, contraintes mécaniques lors de la fabrication, éjections de poudre et de liquide, ...) toutes issues du caractère très multiphysique de ce procédé. Le défi majeur aujourd’hui est donc d’améliorer la compréhension et la maîtrise de dernier.

La particularité de cette technique est d’avoir des pièces fabriquées par fusion successive de couches de poudre déposées séquentiellement les unes sur les autres. Les zones fondues par laser sont de formes adaptées à la géométrie finale (figure I.18).

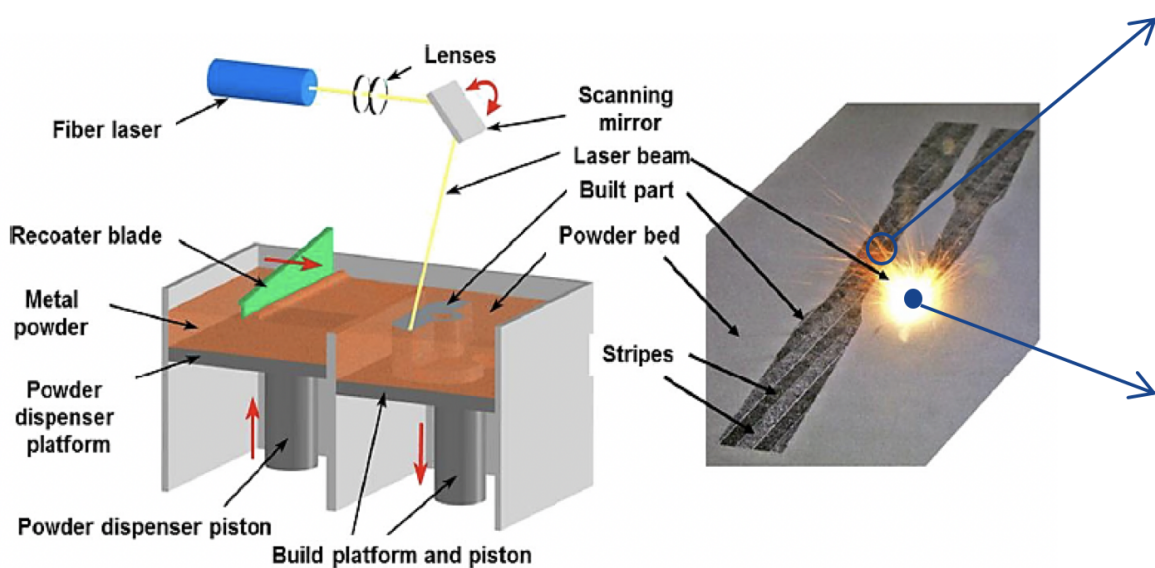


FIGURE I.18: Principe de fonctionnement d’une machine SLM



Cette étude financé sous forme de thèse (Y. Mayi) par Safran Additive Manufacturing est un élément d'une étude plus globale dans laquelle trois laboratoires sont impliqués sur des thématiques numériques complémentaires. L'objectif étant d'utiliser la simulation pour accroître la connaissance et la maîtrise du procédé SLM (Selective Layer Melting).

- Premièrement, l'I2M vise à étudier le comportement de la poudre lors de son étalement. Pour ce faire, la méthode des éléments discrets est utilisée. L'objectif est double, définir quelle est la meilleur stratégie d'étalement et définir quelle est le critère seuil de qualité de poudre.
- Deuxièmement, le PIMM a pour objectif de simuler de la manière la plus physique possible la fabrication à l'échelle de la zone fondue. L'objectif est ici d'analyser physiquement certains phénomènes (dénudation, éjections, absorption, ...) potentiellement pénalisants pour le procédé et d'identifier quelles sont les hypothèses physiques et numériques les plus efficaces pour une simulation à plus grande échelle.
- Troisièmement, le Cemef a pour tache le développement d'une simulation de la fabrication d'un volume élémentaire (plusieurs cordons sur plusieurs couches).

#### Objectifs :

Les objectifs de cette étude sont de plusieurs ordres :

- Développer et valider expérimentalement un modèle multiphysique d'un monocordon pour améliorer la compréhension du procédé.
- Analyser, grâce à ce modèle, les origines de défauts classiques en SLM (éjection de vapeur, de particule (ou gouttelette) et dénudation.
- Identifier les hypothèses les plus efficaces pour une simulation de plus grande échelle (interaction avec le Cemef).

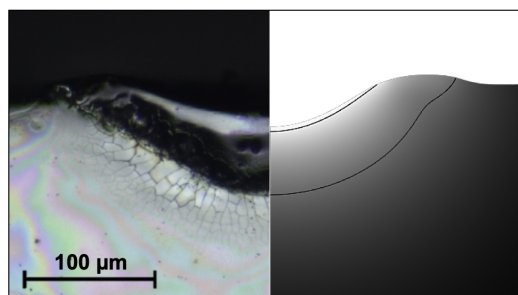
#### Modèles et application :

La démarche globale a été de développer, en premier lieu, un modèle géométriquement simplifié, 2D axisymétrique dans lequel les phénomènes physiques sont ajoutés séquentiellement. Ensuite, une fois validé expérimentalement, ce modèle sera étendu au cas tridimensionnel.


Les étapes ont été les suivantes :

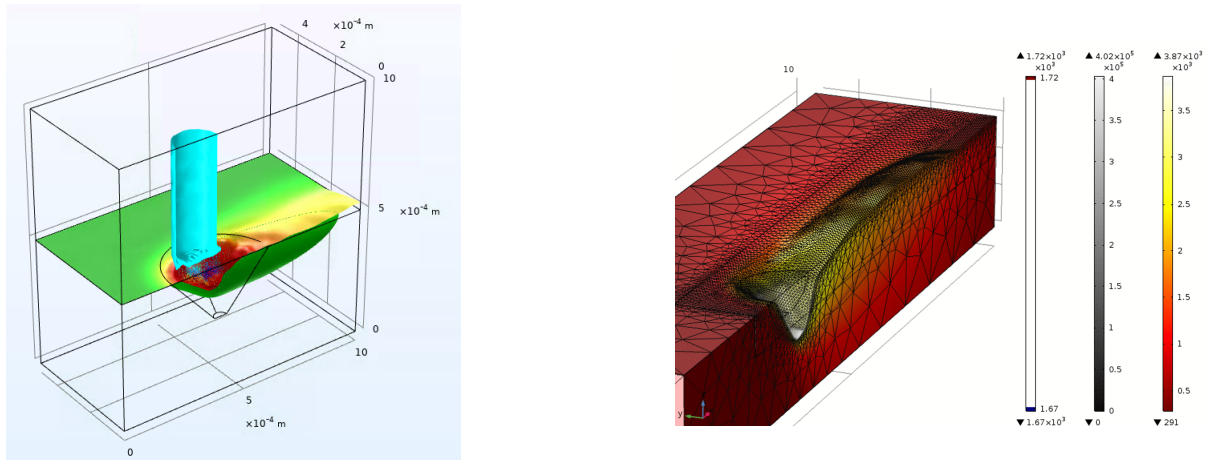
### 1. **Modèle de soudage 2D axisymétrique + validation de la forme de ZF**

Hypothèses : Thermique, Mécanique des fluide (incompressible) et ALE dans le métal



**FIGURE I.19:** Validation de la forme de ZF - soudage statique

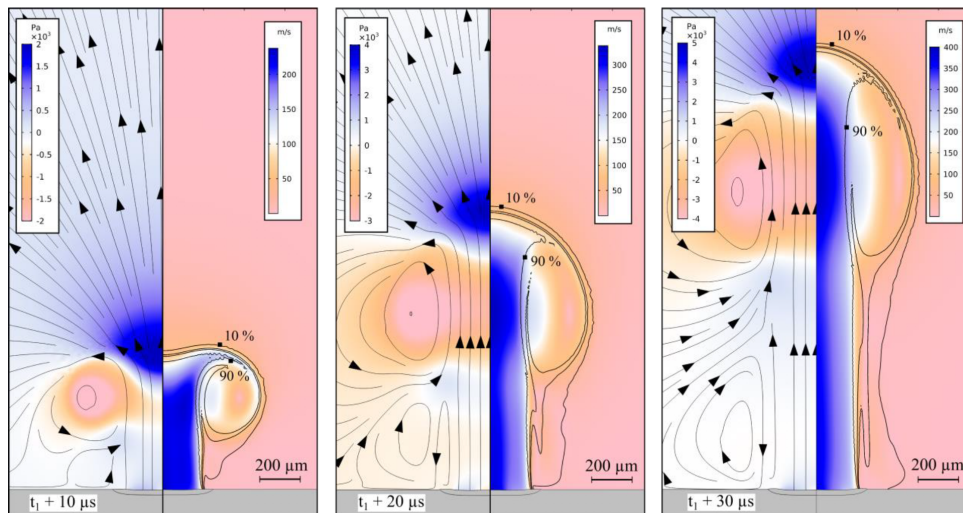
 **Note** Des études de faisabilités sont réalisées en parallèle de cette démarche, notamment sur la gestion de l'interface par la méthode Phase Field (publication en cours de rédaction) :



**FIGURE I.20:** Exemple de résultats 3D avec interface Eulerienne (gauche) et Lagrangienne (droite)

## 2. Modèle de soudage 2D axisymétrique avec vapeur + validation de la vitesse de gaz

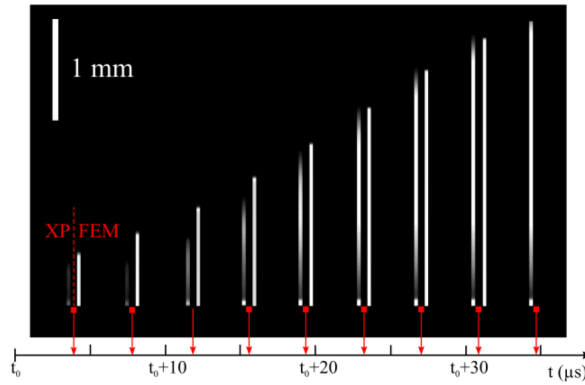
Hypothèses : Thermique, Mécanique des fluide (incompressible) dans le métal + Thermique, mécanique des fluides (compressible), transport d'espèces chimiques dans le gaz et ALE à l'interface.



**FIGURE I.21:** Résultats de simulation (champs de pressions et de vitesses, isovalues de concentration - soudage statique avec vapeur

Cette étape fait l'oeuvre d'une publication récente <sup>12</sup> dans laquelle les détails de la simulation sont présentés et où une interprétation de l'effet du gaz environnant sur la SLM est proposée. Nous y présentons notamment un comparaison entre helium et argon et concluons que, de manière contre intuitive, l'helium, plus léger a tendance à emporter plus de poudre en raison de sa plus grande vitesse radiale.

12. Y A Mayi, M Dal, P Peyre, M Bellet, C Metton, C Moriconi and R Fabbro, Laser-induced plume investigated by finite element modelling and scaling of particle entrainment in laser powder bed fusion, Journal of Physics D : Applied Physics 53, 7 (2019), 075306

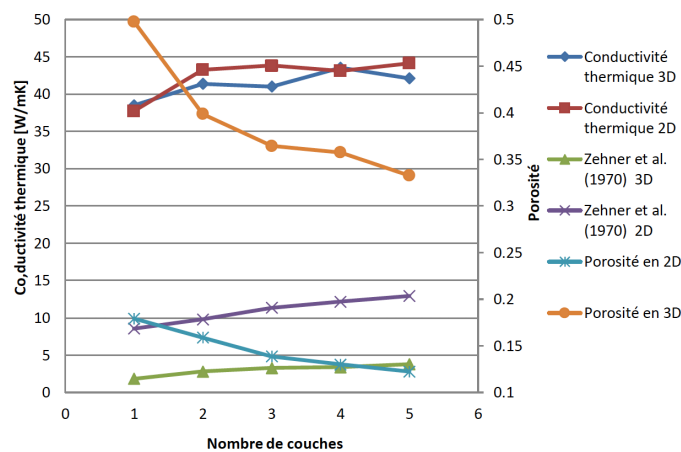


**FIGURE I.22:** Hauteur de plume de vapeur numérique (droite) et expérimentale (gauche) en fonction du temps, au centre du faisceau

### 3. Modèle SLM (avec poudre) 2D axisymétrique

Hypothèses : Thermique, mécanique des fluides dans le métal (solide, liquide et poudre) et poudre simulée en tant que milieu continu à propriétés équivalentes, densification avec hystérésis de la poudre.

Dans ce cas, les propriétés équivalentes (homogénéisées) de la poudre ont été traitées avec un soin particulier. En effet, les modèles usuels de la littérature reposent sur des volumes élémentaires tri-dimensionnels or dans notre cas la couche de poudre n'est pas de dimensions équivalentes dans les trois dimensions (épaisseur de 1 ou 2 grains uniquement). Pour valider nos hypothèses, une étude de six mois (stage) a été réalisée afin de modéliser (thermiquement) les transferts de chaleur dans un milieu granulaire et de simuler des essais de mesure de propriétés (méthode flash). Bien qu'assez incertains, on observe sur les résultats (figure I.23) une forte sous évaluation de la conductivité thermique de la poudre dans la direction de l'épaisseur de la poudre. Ces résultats sont à confirmer dans une étude de plus grande envergure.

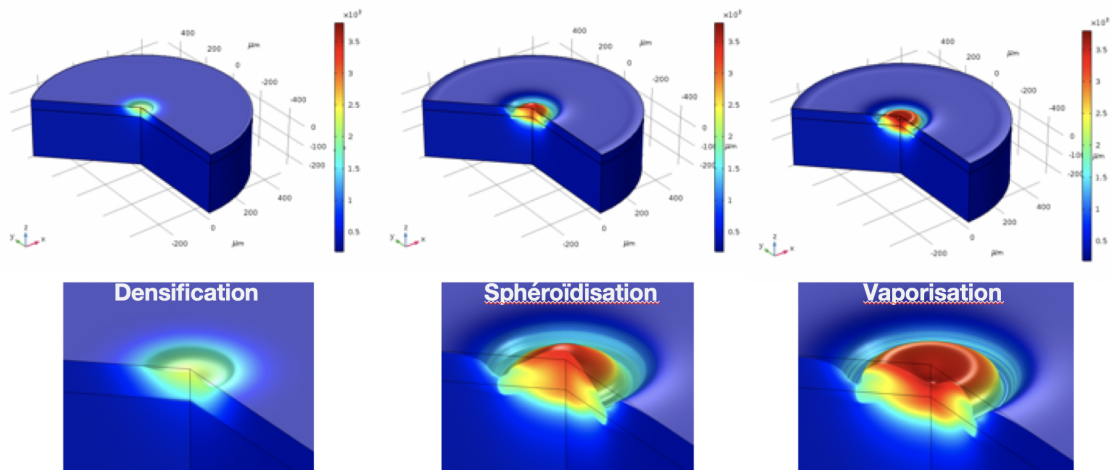


**FIGURE I.23:** Comparaison de la diffusivité thermique mesurée (numériquement) avec la littérature - Stage Achraf Kessentini sur matériau cuivre



**Note** Notons que ces travaux, en cours, ne sont pas encore validés expérimentalement mais le seront dans





**FIGURE I.24:** Résultat numérique (champs de température) des développements SLM 2D et régimes de comportement de la zone d'interaction

*un futur proche. Pour le moment, ils ont fait l'objet d'une comparaison au modèle numérique développé par le Cemef, concluant que les deux approches donnent des résultats assez similaires (publication de cette comparaison en cours).*

#### 4. Actions en cours ou à venir

La thèse portant cette étude n'étant pas encore terminée quelques actions en cours et des étapes supplémentaires sont à ajouter :

- Ajout des réflexions multiples (stage et développements en cours)
- Modèle SLM 3D (sans vapeur) + validation expérimentale et numérique (Cemef) (simulations en cours)
- Modèle SLM 3D (avec vapeur) + validation

#### c) Limites et perspectives

Durant cette troisième étape (ajout de la vaporisation) il a été montré par divers moyens de validation, que la physique intégrée dans les simulations (ablation et SLM) est réaliste. Néanmoins, le point commun de ces deux études est le faible taux de déformation de l'interface liquide/vapeur, favorable à l'utilisation de la méthode ALE. Or, ces modèles ont pour perspective d'être utilisés pour traiter d'autres applications lasers telles que le **perçage** (Projet en attente avec S. Costil ICB sur la texturation de surface) ou le **soudage** (projet ANR-DFG FASTLAS avril 2020), présentant tous deux des capillaires de vapeur avec d'importants rapports de formes.

Notons que deux difficultés se posent alors :

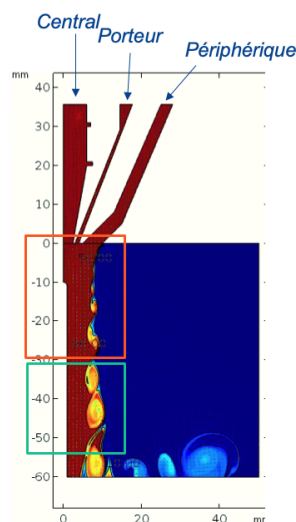
- dans ces applications, le cisaillement du gaz sur le liquide est un phénomène très important, or les méthodes Euleriennes sont connus pour être efficaces pour suivre d'importantes déformation mais peu représentatives des écoulements aux interfaces (la variation arbitraire de la viscosité perturbe de fait la contrainte visqueuse et donc les écoulements locaux).

- l'importante pénétration de la vapeur dans la zone liquide favorise les multiples réflexions du faisceau laser sur les parois du capillaire de vapeur. La méthode de "ray-tracing" est largement utilisée dans ce cas, cependant, l'interaction du faisceau avec une paroi "Eulerienne" n'est pas directe aujourd'hui avec l'outil Comsol Multiphysics<sup>®</sup> et devra faire l'objet de développements spécifiques.

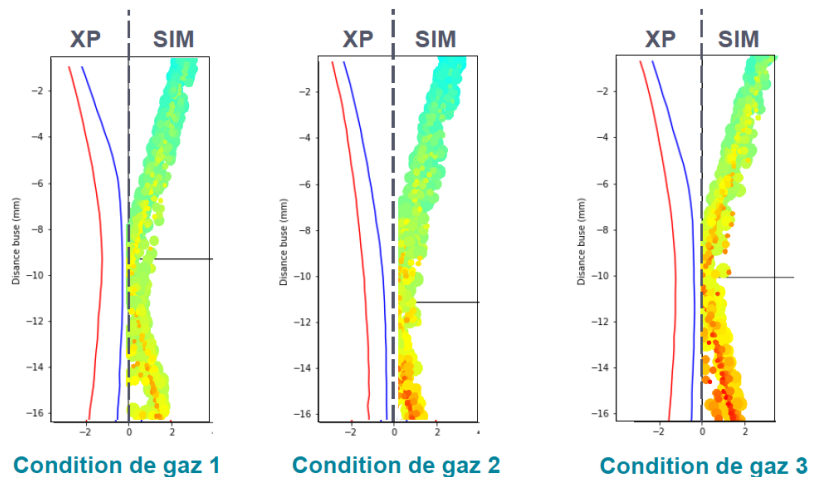
#### 4. Études supplémentaires/complémentaires

En complément de cette démarche de simulation de la zone d'interaction laser-matière, des études sont en cours sur des éléments connexes :

- simulation des écoulements gazeux (figure I.25-a) et particulaires (figure I.25-b) dans une buse de projection de poudre pour la fabrication additive (thèse E. Ferreira - Safran AM). L'objectif est ici d'utiliser les informations numériques partielles (buse uniquement) dans une analyse expérimentale plus complète sur la sensibilité du procédé aux paramètres secondaires.



a) Écoulements gazeux en projection de poudre (Ar dans Air)



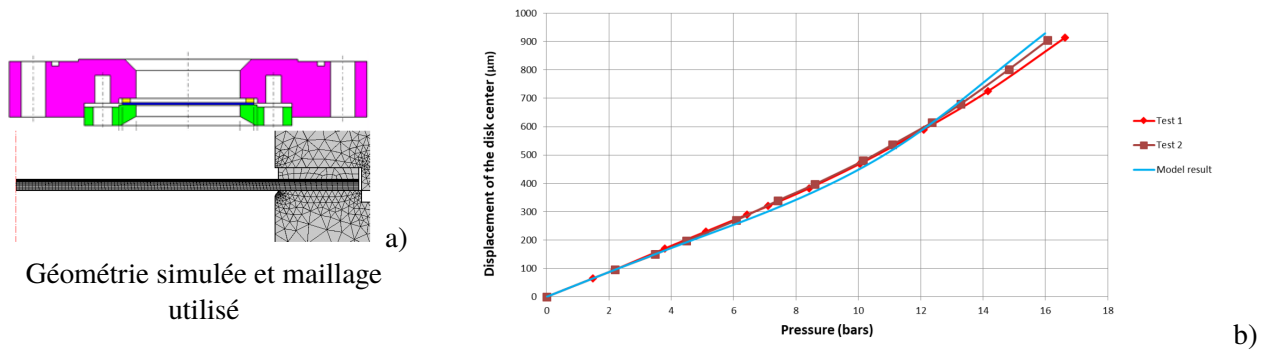
b) Comparaison numérique-expérimentale distribution de poudre

**FIGURE I.25:** Exemple de résultats numériques et expérimentaux en fabrication additive LMD

- simulation de l'ouverture de brèche dans les conduites de transport d'oxygène pur (thèse K. Ayfi - Air Liquide). Dans ce travail, deux simulations sont développées : un modèle thermo-mécanique (fini et validé figure I.26 a) et b), avec P. Lorong) et une simulation thermo-hydrodynamique avec calcul des espèces chimiques et apport de chaleur du à la combustion (en cours).

Si ces études peuvent sembler découplées de la démarche globale présentée précédemment, elles sont en fait des développements élémentaires qui seront par la suite intégrés à des simulations d'interactions laser-matière.

Dans les travaux d'E. Ferreira, un modèle couplant écoulements gazeux, diffusion d'espèces chimiques et trajectoire de particules permet, aujourd'hui, une analyse de l'effet de la buse de projection sur l'apport de matière en LMD. Pour le moment, l'effet de cette apport de matière sur la fabrication est étudié expérimentalement. Cependant, en Octobre 2019, une thèse (J. Guy) a débuté au sein de notre équipe ayant en partie comme objectif de coupler l'étude numérique de l'apport de matière (précédente) à une étude thermo-hydrodynamique telle que



**FIGURE I.26:** Simulation thermo-mécanique de la déformation d'un cylindre soumis à un différentiel de pression

décrite lors des trois étapes présentées précédemment.

Les travaux de K. Ayfi, sur la simulation de la combustion de métaux, pourront être reformulés pour simuler de l'oxydation "naturelle" rencontrée par exemple, lors du soudage sous air ou des procédés particuliers tels que l'oxycoupage. De la même manière, le problème thermo-mécanique encore assez peu traité dans notre environnement car hors des échelles étudiées (mésos), ouvre à de potentielles futures interactions avec la thématique "choc laser" de l'équipe.

## 5. Validations expérimentales - moyens de mesure

Dans les simulations que nous traitons les données de sortie utilisables pour la validation sont de plusieurs types :

- les variables d'état (température, vitesse, position, ...)
- les observables géométrique (dimension de zone fondue, forme d'un écoulement, ...)

Notons que dans la plupart des cas, ces informations sont obtenues par analyse et traitement de vidéos issues de caméras rapides dont la maîtrise est un des savoir-faire de l'équipe depuis sa création. En effet, les installations expérimentales de notre plateforme sont assez largement équipées en caméras (7 modèles différents) et en moyen optiques en général.

### a) Mesure de forme

La mesure de forme est par définition la première information mesurable par caméra rapide. Elle permet des analyses physiques de comportement [I.27](#) <sup>6</sup> et des vérifications de dimensions caractéristiques.

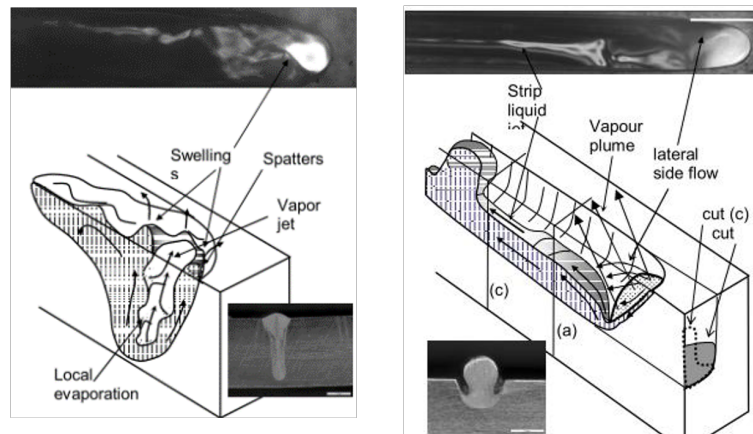
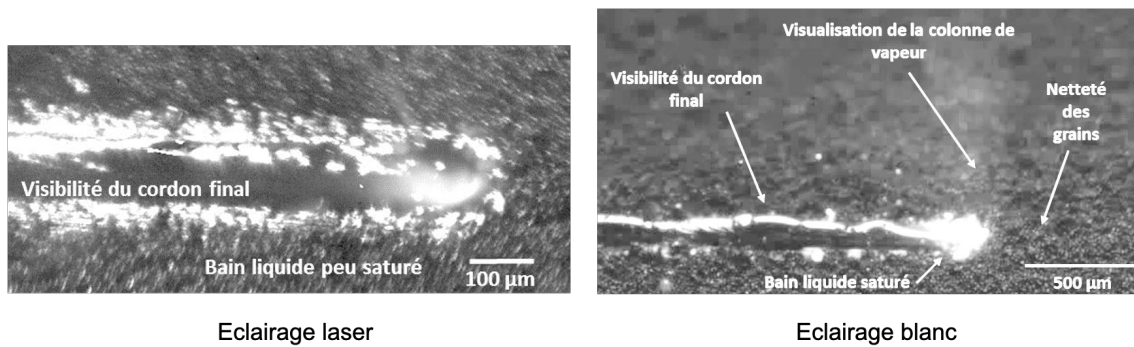


FIGURE I.27: Vidéos rapides pour l'analyse des régimes de soudage

Notons que différentes configurations d'éclairage annexe peuvent être envisagées :

1. pas d'éclairage : Le flux rayonné capté par la caméra est donc issu du rayonnement thermique propre de la zone chauffée. Cette méthode est souvent plus favorable à la mesure de dimensions de zone fondue (gradient de température visible). Cependant, les zones très chaudes (capillaire de vapeur) seront saturées et les zones froides (solide) seront trop peu rayonnantes pour être vues.
2. éclairage blanc (halogène - figure I.27) : le flux capté par la caméra est maintenant filtré et issu à la fois du thermique rayonné et du flux de la lampe réfléchi à la surface de la pièce. Cette technique permet une meilleure observation des zones froides et chaudes mais les faibles puissances et la trop large bande spectrale d'émission ne sont pas optimales, i.e. les zones très chaudes restent saturées.
3. éclairage monochromatique (laser) : Dans ce cas, le rayonnement arrivant dans la caméra est filtré finement autour de la longueur d'onde du laser d'éclairage donc seul (quasiment) le rayonnement réfléchi issu du laser est capté. Cela permet une visualisation des zones chaudes et froides sans influence de la température locale de la pièce. Plutôt utilisée pour l'analyse physique, cette technique présente néanmoins un problème

de réflexions spéculaires locales liées au laser annexe et à la rugosité de l'objet observé (figure I.28<sup>13</sup>).



**FIGURE I.28:** Vidéos rapides de monocordons SLM en fonction du type d'éclairage (laser Cavitar® à 810 nm)

## b) Mesure de vitesses de jets de particules

La mesure de vitesse de particules se fait ici par traitement d'images issues de vidéos rapides. La philosophie, assez simple, consiste à localiser des particules sur l'ensemble des images et en connaissant la fréquence d'acquisition, il est possible de remonter directement à la vitesse de chacune d'elles.

L'outil utilisé est la librairie *trackpy* de *python 2.7* permettant la réalisation des trois actions suivantes :

1. Recherche de position des particules
2. Calcul des trajectoires sur un nombre d'images donné
3. Calcul des vitesses de chaque particule

La figure I.29 illustre ces trois étapes dans le cadre de la fabrication additive par projection de poudre. Dans cet exemple, le calcul est fait sur une plage de 20 images à 12000 Hz dans une zone proche du plan focal poudre du procédé. Sur la vignette correspondant aux vitesses, les couleurs et longueurs de flèches indiquent l'amplitude de la vitesse calculée.

Cet outil, particulièrement approprié pour les configurations où les variations de vitesses sont faibles (LMD), présente quelques limites ou contraintes pour les applications plus complexes. La figure I.30 illustre les résultats obtenus lors de la mesure de vitesse des éjectats en fabrication additive SLM. Sur la première vignette de cette figure, deux zones distinctes sont clairement visibles. La première, dans la partie basse de l'image, permet de bien identifier les particules les unes des autres et donc de calculer les trajectoires. La seconde, dans la partie haute, est moins lisible. En effet, en raison des vitesses plus importantes, la distance entre une particule à deux instants différents est plus grande que celle entre deux particules. L'algorithme ne peut donc pas identifier les particules les unes des autres, invalidant de fait, le calcul de vitesse dans cette zone. Notons que dans ce cas, le traitement a été réalisé avec une 10 images pour une fréquence de 4000 Hz.

Cette méthode reste cependant applicable sous réserve d'une fréquence d'acquisition supérieure.

13. V. Guenthiram, Compréhension de la formation de porosités en fabrication additive (LBM). Analyse expérimentale de l'interaction laser – lit de poudre – bain liquide, PhD thesis, 2018

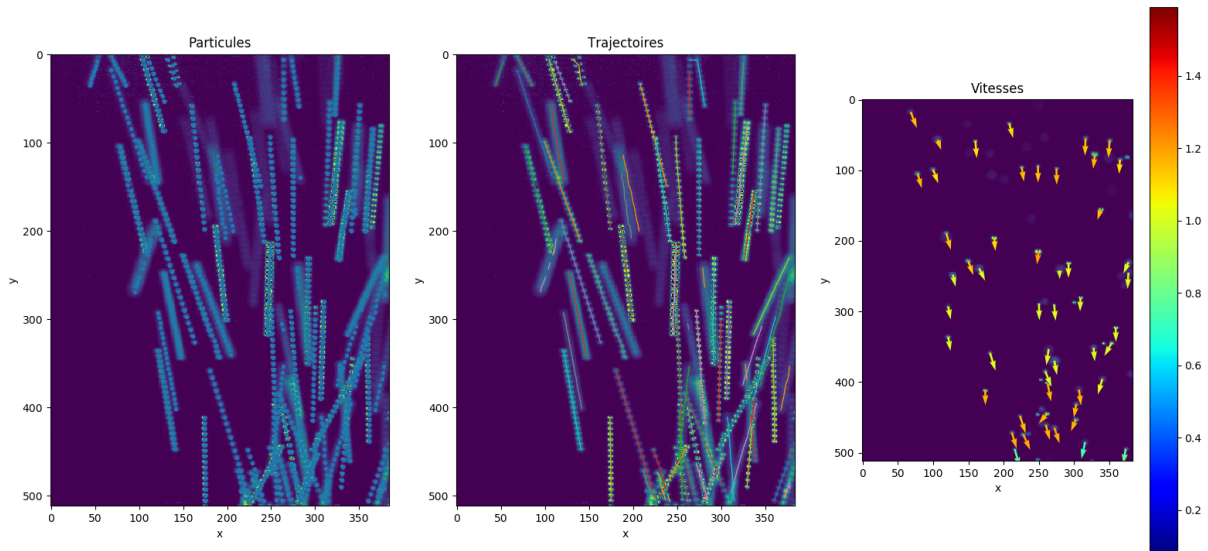


FIGURE I.29: Mesure de vitesse de particules en projection de poudre laser

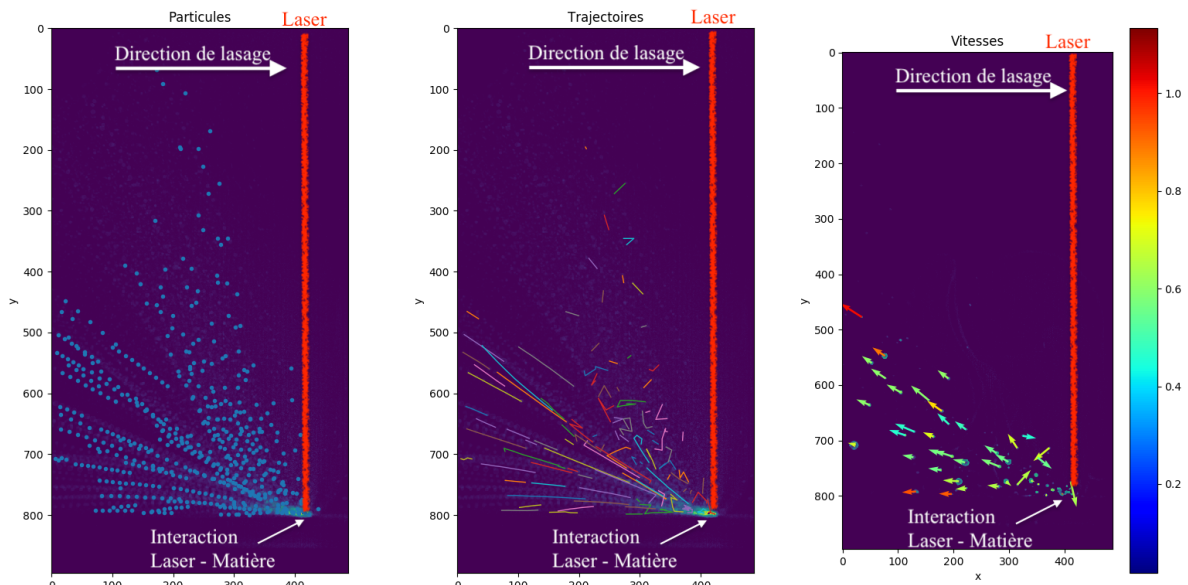


FIGURE I.30: Mesure de vitesse des éjectats en SLM

### c) Mesure de température

Cette méthode introduite dans l'équipe avant mon arrivée repose en réalité sur deux techniques distinctes : la pyrométrie spectrale (spectrométrie) et la pyrométrie 2D monobande. La première a l'avantage de permettre à la fois une mesure de température et d'émissivité mais uniquement localement. La seconde permet uniquement une mesure de température mais en 2D. N'ayant pas utilisé la première dans le cadre de mes activités, elle ne sera pas représentée ici. Toute information complémentaire est clairement expliquée dans la littérature <sup>14 15</sup>.

14. M. Muller, R. Fabbro, Temperature measurement of laser heated metals in highly oxidizing environment using 2D single-band and spectral pyrometry, *Journal of Laser Applications* 24, (2012) 022006

15. M. Muller, Etude du processus d'initiation par laser de la combustion d'un alliage métallique sous atmosphère d'oxygène, PhD thesis, 2013



Nous nous concentrerons donc sur la seconde. Cette dernière, basée sur l'étalonnage des niveaux de gris d'une caméra rapide, repose sur deux principes :

- La loi de Planck

$$L_{\lambda,B}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_b\lambda T}\right) - 1}$$

- La relation de linéarité des capteurs

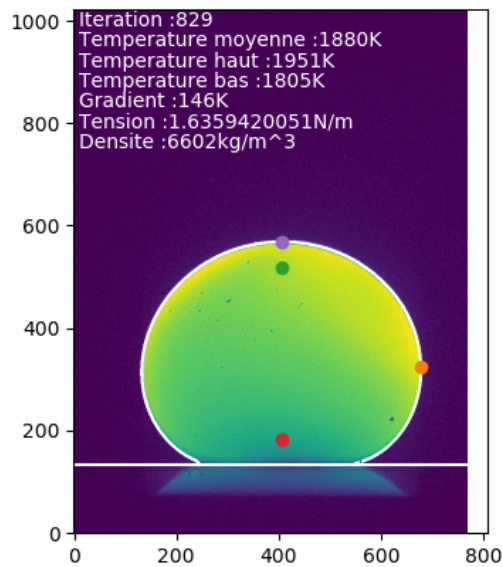
$$N_g = kX + d$$

avec  $N_g$  le niveau de gris converti par la caméra,  $X$  l'énergie réellement reçue par le capteur,  $k$  et  $d$  les paramètres de la loi linéaire.

$$X = L_R(T) \tau 10^{-D}$$

où  $L_R$  est la luminance globale, i.e. la luminance spectrale intégrée sur la bande de longueurs d'onde considérée (approchée par  $L_R = \varepsilon c_0 L_{\lambda_0,B}$ ),  $\tau$  est le temps d'intégration de la caméra et  $D$  la valeur d'une potentielle densité optique positionnée sur le chemin optique de la caméra.

Après identification des paramètres de la loi  $N_g = f(X)$  grâce à des essais sur des corps purs (phase d'étalonnage), il est directement possible d'extraire la température des relations indiquées ci-dessus et donc de convertir la matrice de niveaux de gris issue d'une caméra en image thermique (figure I.31).



**FIGURE I.31:** Champs de température d'une goutte d'acier sur substrat de tungstène

Notons que dans le cadre des mesures de propriétés thermophysiques (partie à suivre) nous avons en partie reformulé la méthode afin de pouvoir l'appliquer avec des caméras rapides à réponses non linéaires (les *Phantom* par exemple).



## 6. Conclusion partielle

Dans cette partie, ont été décrits les travaux de l'équipe concernant la simulation numérique d'applications lasers. La démonstration a été faite que les outils sont maintenant existant et validés pour simuler la majorité des applications dites continues et cela à divers niveaux d'exigence physique. Les éléments manquants encore aujourd'hui sont soit en cours d'étude, soit en perspectives à court terme.

Dans cette démonstration, plusieurs éléments sont à noter. Les perspectives de recherche présentées par la suite seront fortement liées à ces observations.

Premièrement, la diversité des applications laser est telle que différents niveaux de simulations peuvent être réalisés, de la thermique seule à des cas très multiphysiques. Rappelons que notre implication sur la simulation des applications lasers se restreint à l'échelle mésoscopique.

Deuxièmement, pour les modèles très multiphysiques, la gestion précise de l'interface liquide/vapeur est encore aujourd'hui un défi pour les cas fortement déformés tels que le perçage ou le soudage forte épaisseur.

Troisièmement, les simulations présentées précédemment sont toutes soumises à une forte dépendance aux données d'entrées. Ces dernières sont de deux types, les données procédés et les données matériaux. Si les premières sont bien maîtrisées ou du moins aisément mesurables, les secondes le sont beaucoup moins. En effet, il est difficile aujourd'hui de trouver des informations fiables dans la littérature sur le comportement des métaux à hautes températures i.e. de la fusion à l'évaporation, plage critique pour les applications laser.



## C- Mesure des propriétés thermophysiques de métaux fondus



### Contexte

Cette thématique, dont l'intérêt pour la simulation numérique a été illustré précédemment, a été initiée il y a environ sept ans au sein de notre groupe. Elle se base sur les connaissances et compétences de l'équipe en procédés lasers, en instrumentation optique et analyse physique. En effet, les verrous principaux rencontrés habituellement sur ces mesures sont en fait globalement maîtrisés par l'équipe pour les applications usuelles :

- les **hautes températures** sont facilement atteignables par chauffage laser (10 kW) ;
- l'**environnement gazeux** est déjà un élément clef dans nos applications, notamment sur la thématique de combustion des métaux (diverses enceintes, à vide ou sous pression) ;
- la **mesure de température** de métaux fondus, une méthode a déjà été développée et validée se basant sur l'étalonnage de caméra rapide et mesurant jusque la température de vaporisation des métaux les plus réfractaires (W) ;
- la **mesure de forme** résolue dans le temps est directement accessible à partir de vidéos réalisées par caméras rapides, très récurrentes dans les actions de l'équipe.

Pour encadrer financièrement cette activité, plusieurs projets ANR ont été proposés sans succès. Finalement, les moyens étant déjà existants (enceinte, caméra, laser, ...) et par une implication forte de F. Coste (IR cnrs) et moi même, les premiers résultats ont été obtenus lors d'études sur fonds propres (stages) puis contrats directs (CEA DAM).

Par la suite, le succès des premiers développements (publications), a ouvert la voie à des études de valorisation applicatives (contrat direct Timet et thèse Onera).

Aujourd'hui, l'avancement de la recherche sur le sujet passe par une demande de financement étatique de thèse (demande en cours) et par des collaborations en cours (UBS) et à venir (IFSW Stuttgart).

### 1. Introduction et démarche globale

Dans cette thématique, l'objectif est le développement et la validation des méthodes de mesure des propriétés suivantes en fonction de la température pour les métaux usuels fondus :

- Conductivité thermique (notée  $\lambda$ )
- Masse volumique (notée  $\rho$ )
- Chaleur massique à pression constante (notée  $c_p$ )
- La tension de surface (notée  $\gamma$ )
- La viscosité dynamique (notée  $\mu$ )

Propriétés que l'on retrouve directement pour la résolution de problèmes thermo-hydrodynamiques dans, respectivement, les équations de la chaleur, de conservation de la masse et de conservation de la quantité de



mouvement :

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot \lambda \nabla T$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = \nabla \cdot (p \mathbf{I} + \mu \nabla v + \nabla v^T) + \rho g + K v$$

Notons que la tension de surface n'apparaît pas dans les principes de conservation volumiques ci-dessus mais sur l'interface du fluide étudié avec son environnement gazeux (pression de Laplace :  $\Delta p = \gamma \kappa$ ).

Nous pouvons catégoriser ces propriétés en deux familles, les propriétés plutôt thermiques ( $\lambda$ ,  $c_p$ ), les propriétés plutôt fluides ( $\gamma$ ,  $\mu$ ) et la masse volumique, commune aux deux problèmes. Ces propriétés ont été fortement étudiées de nombreuses fois dans la littérature et des méthodes existent bien-sûr déjà. Cependant, elles sont généralement appliquées à des solides ou à des liquides froids. Notre démarche a donc été de prendre connaissance de ces méthodes et de les adapter à notre configuration extrême des métaux fondus.

## 2. Tension de surface

Dans toutes les méthodes existantes nous avons retenus celles de la "goutte" qui peut être posée, en lévitation ou tombante. Ces méthodes reposent sur deux principes, le premier dit qu'en statique, la forme d'une goutte posée sur un substrat dépend de sa tension de surface et de la gravité uniquement. Le second, en dynamique, dit que, pour un mode particulier, la fréquence d'oscillation de la surface d'une goutte est aussi directement liée à sa tension de surface.

### a) Méthode de la goutte posée

Principe :

Le principe de cette méthode, publié <sup>16</sup> pour des métaux réfractaire en 2019 repose sur le bilan des pressions s'exerçant sur la goutte à l'équilibre. La pression hydrostatique dans la goutte et la pression de Laplace étant compensés par la résultante du poids de la goutte sur le substrat :

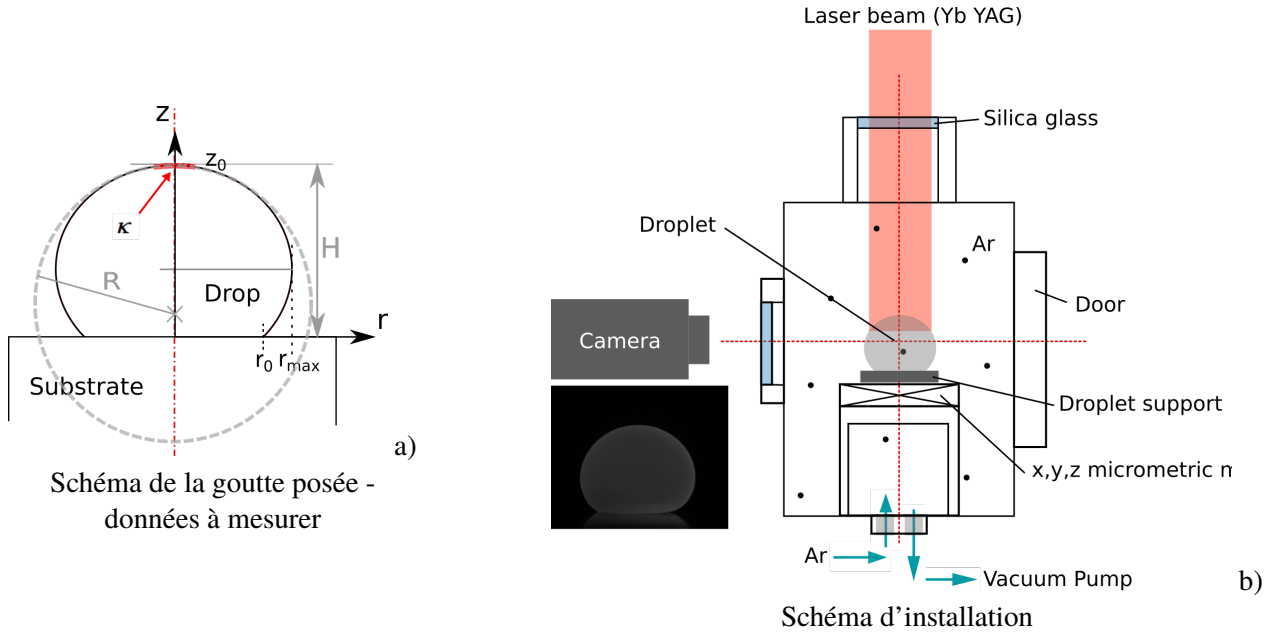
$$\frac{mg}{S} = \gamma \kappa + \rho g z_0$$

avec

$$S = \pi r_0^2$$

16. M. Dal, F. Coste, M. Schneider, R. Fabbro, R. Bolis, Laser based method for surface tension and density measurements for liquid refractory metals (Nb, Ta, and W), Journal of Laser Applications, 2019, 022604.

La tension de surface peut donc être identifiée grâce aux données géométriques observées par caméra rapide, i.e. le rayon de contact  $r_0$ , la courbure à l'apex de la goutte  $\kappa$  et la hauteur de la goutte  $z_0$  (figure I.32-a et b). Pour des raisons d'équilibre thermique, les mesures sont réalisées après l'arrêt du laser, pendant la phase de refroidissement de la goutte.



**FIGURE I.32:** Principe et dispositif expérimental pour la mesure par goutte posée

#### Validation :

Afin de valider cette méthode, des essais ont été réalisés sur divers matériaux métalliques usuels (fer, acier, titane) et réfractaires (Tungstène, Niobium et Tantale).

Pour ne citer que cet exemple, les essais sur tantale ont été particulièrement prometteurs en terme de justesse des mesures (au regard de la littérature) et d'écart-types (figure I.33).

De ces courbes de tension de surface et de masse volumique, des valeurs numériques peuvent être extraites sous les formes, intégrables à des simulations, suivantes :

$$\gamma T = \gamma_0 + \frac{\partial \gamma}{\partial T} (T - T_{fus}) \quad (I.5)$$

Tantale	Essais	Littérature <sup>17</sup>
$\gamma_0 \text{ Nm}$	$2.18 \pm 0.17$	2.15
$\frac{\partial \gamma}{\partial T} \text{ Nm.K}$	$-2.9 \times 10^{-4}$	$-2.1.10^{-4}$

**TABLE I.2:** Validation de la tension de surface et du coefficient thermo-capillaire.

$$\rho T = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial T} T - T_{fus} \quad (I.6)$$

#### Bilan de la méthode :

Cette méthode, plutôt efficace et extrêmement simple à mettre en oeuvre reste néanmoins dépendante du substrat utilisé, ici le tungstène. En d'autres termes, les métaux aux températures de fusion proches de celle

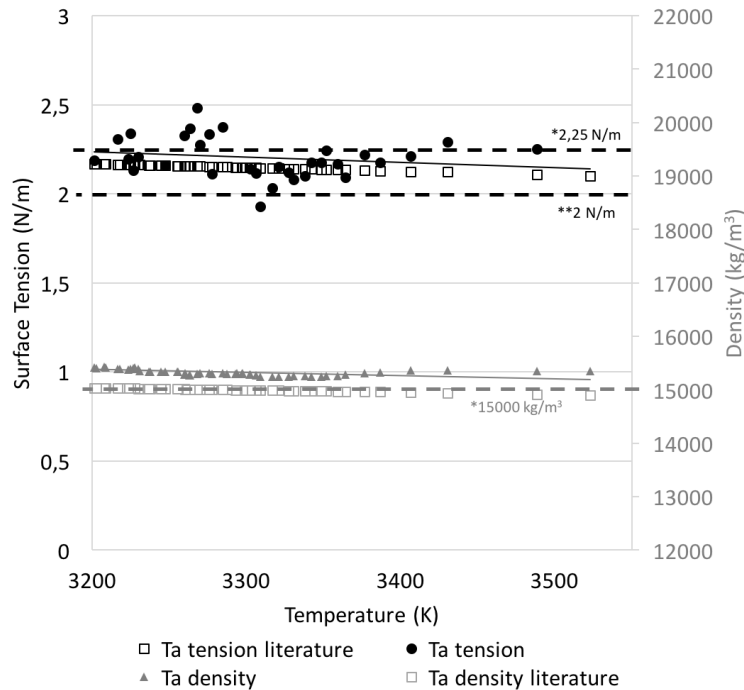


FIGURE I.33: Comparaison mesure et littérature sur tantale

Tantale	Essais	Littérature <sup>17</sup>
$\rho_0 \text{ kgm}^3$	15415	15000
$\frac{\partial \rho}{\partial T} \text{ kgm}^3 \text{ K}$	-0.6	-0.4

TABLE I.3: Validation de la masse volumique et du coefficient de dilatation.

du tungstène ne pourront être étudiés. Dans le cas présent, rappelons que cette technique a été développée, en partie, dans le cadre d'un contrat direct avec le CEA et portant justement sur des matériaux réfractaires à base de tungstène. Une deuxième source d'erreur porte sur les mesures elles mêmes. En effet, les informations nécessaires au calcul de la tension sont des distances en absolu. L'échelle spatiale et la discrétisation liée au capteur de la caméra sont donc d'importantes sources d'incertitude.

Pour ces deux raisons, et malgré l'efficacité de la méthode de la goutte posée, les méthodes sans contact sont à privilégier. Deux techniques existants dans la littérature peuvent être appropriées à notre objectif, la lévitation aérodynamique et la lévitation acoustique.

## b) Méthode de la lévitation aérodynamique

### Principe :

La forme d'une goutte en lévitation dans un jet de gaz dépend de la gravité, de la tension de surface du liquide et de l'effort exercé par le gaz. Pour de faibles vitesses d'écoulement et des diamètres de gouttes inférieurs à la longueur capillaire, la tension de surface domine. Une perturbation extérieure se traduira donc par l'apparition et la propagation d'une onde de surface. Pour de faibles déformations, la fréquence propre  $\nu_R$

de l'oscillation d'une sphère peut être formulée par la relation suivante <sup>18</sup> :

$$\nu_R^2 = \frac{\gamma}{3\pi m} l(l-1)(l+2)$$

Avec  $l$  le numéro du mode de vibration étudié et  $m$  la masse de l'échantillon.

Pour le mode deux, la tension se formule donc :

$$\gamma = \frac{3}{8} \pi \nu_R^2 m$$

Dans cette expression, relativement simple, apparaît la fréquence d'oscillation de la goutte ainsi que sa masse. Ces données sont directement mesurables, notamment en observant la forme de l'échantillon, ici aussi par caméra rapide (I.36).

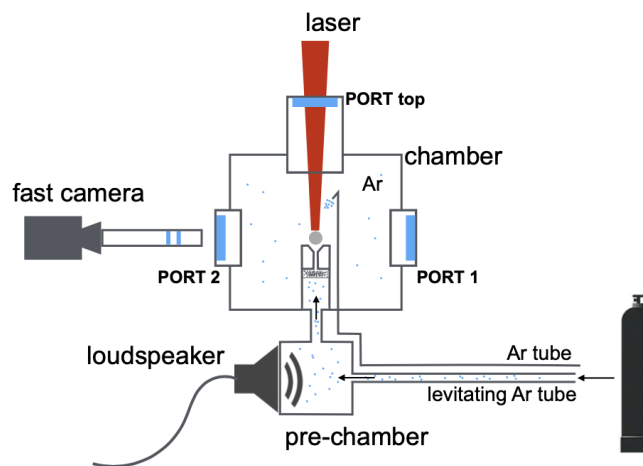


FIGURE I.34: Schéma d'installation de lévitation

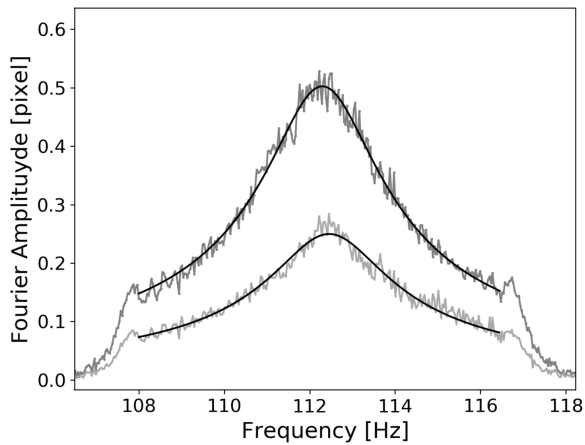
Une bille de faible diamètre (2 - 3 mm) est positionnée, à l'état solide dans un cône par lequel s'échappe le gaz porteur (de l'argon). La bille, portée par le gaz, est fondue par irradiation laser de faible puissance. Les oscillations sont impulsées à l'échantillon à partir de deux systèmes, soit un haut-parleur (configuration classique de la littérature <sup>19</sup>) soit par le laser lui même (notre apport). En effet, cette dernière possibilité permet de simplifier le montage et d'éviter les pertes potentielles et les déphasages dus aux conduites de gaz.

Notons que pour identifier les fréquences des modes de vibrations propres, la méthode la plus classique est de réaliser des variations de fréquence de sollicitation sur une plage donnée et de relever l'amplitude de variation la plus importante (figure I.35- a)).

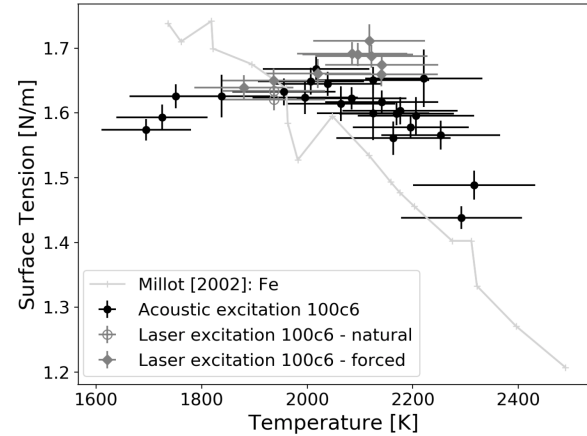
Avec ces fréquences, il est possible de retracer l'évolution de la tension de surface en fonction des températures moyennes de gouttes (figure I.35-b) mesurées par caméra rapide étalonnée <sup>14,15</sup>. La validation de la méthode, est actuellement en cours et se fait en partenariat avec l'Université de Bretagne Sud (laboratoire IRDL), eux même utilisateurs de cette technique (excitation acoustique).

18. Lord Rayleigh, Proc. R. Soc. London 29, 71 (1879)

19. D. Langstaff, M. Gunn, G. N. Greaves, A. Marsing, F. Kargl, Aerodynamic levitator furnace for measuring thermophysical properties of refractory liquids, Review of Science Instrument. 84, 2013, 124901



a) Exemple de variation d'amplitude d'oscillation dans l'espace de Fourier



b) Résultats de tension de surface par lévitation aérodynamique

**FIGURE I.35:** Principe et dispositif expérimental pour la mesure par goutte posée

#### Bilan de la méthode :

Cette méthode, bien qu'assez efficace en terme d'incertitude de mesure reste néanmoins entachée de quelques points délicats :

- l'effet mécanique du jet de gaz sur la bille est difficilement quantifiable et produit deux conséquences majeures, la génération d'un écoulement dans la goutte et son oscillation sur le mode 1 (position en  $z$ ).
- l'effet thermique du gaz, qui, à température du réseau, tend à refroidir la goutte par le bas imposant ainsi un gradient relativement important ( $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- l'effet d'une méthode fréquentielle qui impose, par définition, une mesure sur un certain nombre de cycles.

La dépendance de la tension de surface (ou viscosité) à la température est donc obtenue par la réalisation de plusieurs essais distincts avec des conditions lasers différentes.

### c) Méthode de la lévitation acoustique

Basée sur le même principe physique que la précédente, cette méthode a pour avantage de ne pas positionner l'échantillon étudié dans un jet gazeux mais dans un champs de pression "statique" réduisant l'apport de pression dynamique dans l'équilibre.

Nous n'avons pas encore testé cette méthode autrement qu'en faisabilité (numérique et expérimentale) et n'avons donc pas encore de résultat de mesure de propriétés. Néanmoins, en février 2020, un projet interne au laboratoire a été accepté sur cette thématique. L'idée étant de fabriquer en interne un dispositif de lévitation acoustique grâce au savoir faire de membres d'équipes différentes (dimensionnement illustré sur la figure I.36).

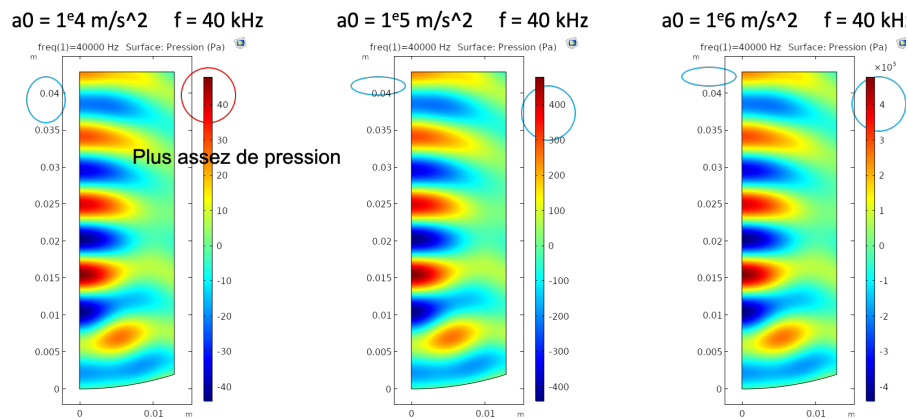


FIGURE I.36: Dimensionnement numérique du montage de lévitation acoustique grâce aux champs de pression simulés

### 3. Masse volumique

La masse volumique, paramètre tout aussi important que la tension de surface, est une propriété beaucoup plus simple à mesurer. Rappelons aussi, que lors de l’application de la méthode de la goutte posée, elle doit être déterminée en amont.

#### Principe :

Le principe est extrêmement simple revient à mesurer la masse de l’échantillon, à froid, et à calculer le volume à chaud. N’y ayant pas de perte de masse, cette hypothèse se justifie. Le volume est calculé grâce au mesure de forme d’une goutte posée ou en lévitation (figure I.37). Connaissant les coordonnées  $r$  et  $z$  du contour de la goutte, des sections élémentaires sont calculées et intégrées sur la hauteur.

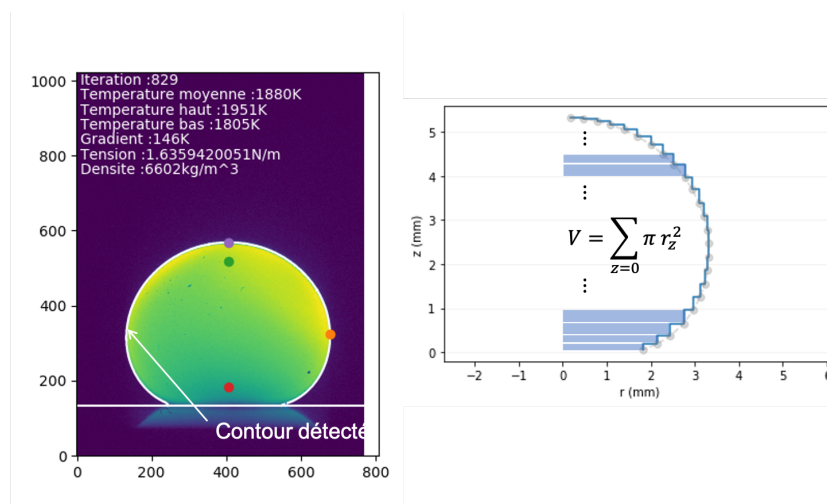


FIGURE I.37: Méthode de calcul de la masse volumique

#### Validation :

Cette méthode a été validée pour la méthode de la goutte posée (figure I.33 et table I.3) où l’erreur reste inférieure à 3 % pour l’exemple du tantale.

En théorie, cette technique devrait être tout aussi efficace pour le cas de la lévitation. Néanmoins, cette dernière

présente un inconvénient majeur, l'échantillon étudié n'est pas visible sur toute sa hauteur, i.e. une partie de la goutte est contenue dans le cône de sortie du gaz. La forme du contour doit donc être extrapolée ajoutant de l'incertitude sur la mesure.

De même, pour certains matériaux, de fortes variations des résultats peuvent apparaître au cours du temps. Cela vient des oscillations volontairement créées (lévitation) ou non (goutte posée) agissant dans le plan normal à celui observé par la caméra. Cela produit donc une surface apparente variable et donc une erreur sur le volume calculé. Néanmoins, entre chaque extremum, les oscillations d'une goutte passent par une forme axisymétrique et donc nous avons choisi de moyenniser la masse volumique sur une période d'oscillation.

#### Bilan de la méthode :

Cette méthode de calcul, assez simple, présente des résultats très intéressants dans le cas de la goutte posée sur des matériaux peu réactifs. Elle présente malgré tout quelques limites lorsque l'échantillon tend à être instable ou lorsqu'il n'est pas visible entièrement. Pour ces raisons, nous privilégierons à court terme la méthode de la goutte posée en stabilisant au maximum le liquide étudié. Par exemple, pour le cas du titane, fortement réactif en milieu oxydant, le contrôle et la minimisation du taux d'oxygène ( $< 10 \text{ ppm}$ ) permet une mesure assez stable et satisfaisante (3 % de dispersion sans contrôle et  $< 1 \%$  avec contrôle).

Plusieurs améliorations sont malgré tout possibles. Il faudrait faire de la mesure de forme tri-dimensionnelle (deux caméras ou autre) pour ne pas avoir de plan non observé et réduire l'incertitude due aux oscillations. De même, la lévitation acoustique serait une technique intéressante pour conserver les avantages de cette méthode (pour la tension de surface) mais en observant l'ensemble de l'échantillon.

## 4. Autres propriétés et conclusion partielle

Cette démarche correspondant à un travail en cours, il y a des actions encore à mener.

La mesure de viscosité a été lancée dans le cadre d'un stage en 2019. La méthode envisagée repose à la fois sur la méthode de la goutte posée et sur le principe des oscillations amorties. Les résultats, très prometteurs sont en cours de finalisation et n'ont pas encore été publiés.

Pour les propriétés thermiques, conductivité et chaleur massique, un travail commun d'encadrement de thèse avec l'Université de Bretagne Sud (IRDL) est en cours de soumission. Dans ce cas, la démarche reposera essentiellement sur des méthodes inverses analytiques et numériques.



## D- Conclusion

Dans ce chapitre relatif à mes activités de recherche, des travaux de simulation des procédés lasers ont été mis en oeuvre. Les applications illustrées ici concernent le soudage, la fabrication additive et le perçage - ablation. Ces modèles ont été validés grâce à des techniques expérimentales, diagnostiques, dédiés, tels que des caméras rapides. Pour alimenter ces modèles, une démarche de recherche de propriétés thermophysiques est aussi développée. Validée pour la tension de surface et la masse volumique de matériaux réfractaires, elle semble particulièrement prometteuse et reste à être réalisée pour la conductivité thermique et la chaleur massique.

Ces actions restent néanmoins à compléter. S'agissant de la simulation numérique, nous convenons que des actions restent à mener pour améliorer le caractère prédictif et généralisable des modèles. Notamment sur la manière de traiter l'interface liquide/vapeur, pour permettre de traiter de fortes déformations tout en conservant un bon comportement géométrique, mécanique et thermique. Dans cette zone particulière qu'est le capillaire de vapeur, des phénomènes sont aussi à ajouter, tels que la redistribution du flux de chaleur par multiréflexion du laser ou l'écoulement rapide de la phase gazeuse. Concernant, les validations, un manque existe pour le moment dans notre démarche sur le contrôle fin de la forme de la zone fondue (côté liquide et côté vapeur). Au sujet des propriétés thermophysiques, si les développements actuels sont satisfaisants, la partie "thermique" du problème reste à faire.

Bien sûr, si cette démarche de rapprochement "simulation - validation - propriétés" est personnelle, la réalisation des différentes actions est en grande partie réalisée en collaboration avec des post-doctorants, des doctorants et stagiaires dans le cadre, essentiellement, de contrats industriels (cifre ou direct) :

### Post-Doctorants

Nom	Application	Encadrement	Fin	Collaborations
R. Bolis	Mesure de tension de surface - Lévitiation	50 %	octobre 2018	cea - Timet

### Doctorants

Nom	Application	Encadrement	Fin	Collaborations
V. Gunenthiram	SLM expérimental	35 %	mars 2018	-
E. Abouda	LMD expérimental (numérique)	30 %	février 2018	Vélan
E. Ferreira	LMD expérimental et numérique	30 %	juin 2020	Safran - Mines ParisTech
K. Ayfi	Combustion des métaux numérique	40 %	novembre 2020	Air Liquide - Coria
Y. Mayi	SLM/soudage numérique + validation	40 %	décembre 2020	Safran - Cemef
J. Guy	LMD numérique + validation	40 %	octobre 2022	Safran



<b>Doctorants</b>				
Nom	Application	Encadrement	Fin	Collaborations
L. Gouton	Oxidation par laser numérique et expérimental	-	novembre 2015	cea
L. Carvalho	Ablation laser numérique et expérimental	-	novembre 2018	cea
<b>Stagiaires</b>				
Nom	Application	Encadrement	Fin	Collaborations
L. Fourcaud	Mesure de tension de surface	100 %	juin 2014	-
H. Chen	Mesure de température IR	100 %	décembre 2014	edf
R. Semenol	Simulation MIG	100 %	juin 2015	-
M. Ducas	Combustion expérimental	20 %	juin 2015	Air Liquide
Z. Jalouli	SLM numérique	100 %	juin 2016	-
S. El Hilali	LMD numérique	100 %	juin 2016	-
A. Kessentini	SLM numérique (propriétés des poudres)	20 %	juin 2019	-
M. Zarbini	Mesure de viscosité	100 %	juin 2019	-
J. Daligaut	Soudage numérique	100 %	juin 2020	-

TABLE I.4: Encadrements.



# Chapitre "Activités d'enseignement"

---

Depuis mon arrivée en 2012, mes activités en terme d'enseignement ont été organisées selon trois axes :

- la gestion de matières, modules et formations
- la construction de cours et de modules
- le présentiel (cours, TD et TP)

## A- La gestion de matières, modules et formations

Durant ces 8 années, j'ai eu l'occasion de reprendre la responsabilité de divers éléments, une option d'une Formation d'Ingénieur en Partenariat (apprentissage), une filière d'un master hébergé en partie à l'école et diverses unités d'enseignements .

### 1. Option Chaudronnerie (300heqTD)

En 2013, il m'a été proposé de prendre la gestion de l'option de Chaudronnerie du parcours Génie Industriel de la formation par apprentissage. Démarrée en 2011, cette option différentielle en deuxième et troisième année du cycle, apportait aux étudiants des connaissances sur les technologies des appareils sous pression, les bases de la science des matériaux, un regard théorique et appliqué sur les procédés d'assemblage (soudage) et sur les moyens de CND. Les fortes interactions avec le Syndicat National de Chaudronnerie, Tuyauterie et Maintenance Industrielle (SNCT) a permis une intégration forte des normes et codes de construction (CODAP). La difficulté de cette gestion était la migration de l'option vers le centre ENSAM de Metz, mieux équipé dans ce domaine et proche de l'Institut de Soudure. Sur l'année 2013-2014, l'essentiel de la formation était dispensée à Paris et seules deux semaines en fin de troisième année, concentrées sur la partie pratique, ont été effectuées à Metz. En 2015-2016, le schéma s'est inversé menant les étudiants trois mois sur ce même site. Malheureusement, depuis 2015, par manque de candidats de niveau suffisant, l'option a pris fin sur Paris.

### 2. Filière Mise en Forme - semestre plus stage

Le master MAGIS (Material and Engineering in Paris) est une formation en mécanique, matériaux et science de l'ingénieur construit en collaboration avec :

- ENS Cachan
- ENSAM
- UPMC
- Ecole polytechnique (paristech)

Il est conventionné avec Centrale Supélec, Mines ParisTech et ESPCI. Dans le cadre de la formation qui y est dispensée, du personnel de chaque tutelle est amené à intervenir.

Il est composé de quatre filières, "1- Endommagement et rupture", "2- Mise en forme des métaux", "3- Cycle de vie des matériaux" et "4- Procédés d'usinage et simulation". La responsabilité de la filière Mise en Forme m'a été transmise en septembre 2019. N'ayant pas participé au montage de cette formation en 2009, une partie intéressante sera néanmoins la refonte partielle ou du moins une réorganisation de la filière afin d'en augmenter l'attrait auprès des étudiants. Jusque maintenant, et pour cette même finalité, certaines unités d'enseignement ont été renommées mais un travail complémentaire reste à apporter dans un avenir proche.

### 3. Formation "Projet" - OPM et CE

Dans la formation de deuxième année du parcours classique (Ingénieurs Grandes Ecoles) des volumes horaires ont été dédiés à la formation par "projet". Successivement, ils se sont nommés OPM (Optimisation Procédés Matériaux) jusque 2016 puis CE (Cas d'Etude). De 2013 à 2016, j'ai eu la responsabilité OPM à construire, i.e. une centaine d'heure (eqTD) pour environ 25 étudiants. De 2016 à 2018, les OPM ayant été supprimés de la formation, un nouveau format sur 85 heures (eqTP), basé sur des acquis d'apprentissage et sur le cycle d'un produit ou d'un système (de la conception à l'industrialisation), a été mis en place. Dans ce dernier contexte, je me suis proposé d'en créer et gérer un. Dans les deux cas, les équipes pédagogiques ont été choisies en fonction des thématiques étudiées. Durant la période OPM, nous étions deux enseignants chercheurs du laboratoire PIMM et quatre industriels à intervenir. Pour les CE, le sujet étant plus "énergétique", l'équipe a été construite entre les laboratoires PIMM et DynFluid.

## B- Construction ou reprise d'unités d'enseignements

Comme il a été dit précédemment, certaines unités d'enseignements ou matières ont été, soit créées de rien, soit reprises. Dans le tableau ci-dessous sont indiqués les niveaux de révision : **Complet**, **Partiel** ou **Nul**. Correspondant respectivement à des matières ou UE, i) reprises à la base et reconstruites en fonction des fiches pédagogiques ou des acquis d'apprentissages visés, ii) reprise en partie afin d'y ajouter des éléments propres à mes compétences (par exemple, du numérique pour le cours de Mise En Forme à l'état Liquide) ou iii) non modifiées et issues de travaux initiaux de collègues.

<b>Matières</b>	<b>Parcours</b>	<b>Années</b>	<b>Niveau de refonte</b>
Mise en forme - Soudage	Apprentissage	1 <sup>ere</sup> + 2 <sup>eme</sup> + 3 <sup>eme</sup>	Complet
Procédés Non Conventionnels	Apprentissage	3 <sup>eme</sup>	Complet
CAO surfacique	Apprentissage	2 <sup>eme</sup>	Nul
Applications Lasers (CM, TD, TP)	Classique	2 <sup>eme</sup>	Complet
Mise en forme à l'état liquide	MAGIS	M2	Partiel
CFD (CM)	Classique	2 <sup>eme</sup>	Complet
<b>UE</b>	<b>Parcours</b>	<b>Années</b>	<b>Niveau de refonte</b>
OPM Assemblage	Classique	2 <sup>eme</sup>	Complet
CE Ecomarathon	Classique	2 <sup>eme</sup>	Complet

**TABLE II.1:** Révision des enseignements réalisés

Pour illustration, seuls la matière "Mise en forme - Soudage" et les UE OPM et CE seront explicités par la

suite.

### Soudage

Dans cette matière, les fiches relatives à la séquence pédagogique des trois années (puis deux après l'arrêt de l'option) sont clairement définies. Les CM et ED ont donc été reconstruits en conséquence. Seuls le cours de troisième année a été reconstruit régulièrement (trois fois) et des Travaux Pratiques (soudage à l'arc et soudage Laser) y ont été ajoutés récemment (2019-2020).

### OPM Assemblage

Ce module d'une centaine d'heures a été construit afin de fournir aux étudiants les bases et les bons réflexes pour le choix d'un procédé de soudage (assemblage) pour une configuration donnée. Pour ce faire, le module commençait par un rappel des généralités sur les procédés de soudage (fonctionnement, avantages, inconvénients, ...), sur la soudure en elle-même (notion de soudabilité, effets sur la matière, ...) et les moyens de contrôle. Dans cette séquence, quatre interventions extérieures ont été ajoutées afin d'illustrer l'assemblage dans l'industrie (nucléaire, automobile, pétrole et métallurgie) et les contraintes qui en découlent. Une partie, simulation de procédé complétait la démarche sous forme de travaux dirigés. Pour finir, différents projets étaient proposés mêlant numérique et expérimental pour divers procédés.

### CE Ecomarathon

Ce cas d'étude, d'environ 75 heqTD, a été proposé et construit lors de la reconstruction de la seconde année du parcours d'ingénieur classique. Dans ce contexte, les fiches pédagogiques ont été retraduites à partir d'"acquis d'apprentissages" jugés nécessaires à la formation d'un ingénieur de l'ENSAM.

Dans ce cadre, des unités d'enseignements, plutôt au format projet, sont nées sur différents sujets mais pour lesquels devaient apparaître des phases de "conception", "fabrication" et "industrialisation". Elles devaient aussi faire apparaître un certain nombre de ces acquis à transmettre aux étudiants. Par exemple :

- **En45** : Choisir et mettre en œuvre une simulation numérique en mécanique des fluides (qualité du maillage, choix des modèles de turbulence,...).
- **En46** : Analyser les résultats obtenus pour évaluer les performances du modèle (sens physique, précision) et le valider par comparaison avec des cas de référence.
- **En47** : Choisir la solution technologique la plus adaptée à un problème concret en tenant compte des contraintes de fabrication et d'industrialisation.

Un programme pédagogique a donc été créé et teinté de l'Ecomarathon Schell bien connu des écoles d'ingénieurs. Même si le faible volume horaire ainsi que le faible financement ne permettaient pas une participation réelle au challenge, ce contexte était très favorable à la démarche pédagogique souhaitée. En effet, l'accent a été mis sur les parties "châssis" et "carrosserie" pour lesquels des cycles de conception et d'optimisation grâce à la simulation numérique (CAO + CFD et FEM) sont réalisées. A l'issue de cette phase, des maquettes sont fabriquées (impression 3D polymère) pour évaluer le comportement des prototypes en soufflerie (laboratoire DynFluid). Une optimisation de matériaux est aussi réalisée dans le respect des contraintes de la compétition. A

cela viennent s'ajouter des études techniques sur la motorisation et sur une potentielle industrialisation (Etude de coût).

Durant ces différentes étapes, des enseignants ou vacataires encadrent les groupes d'étudiants, leurs dispensant les bases et des conseils relatifs à leurs approches.

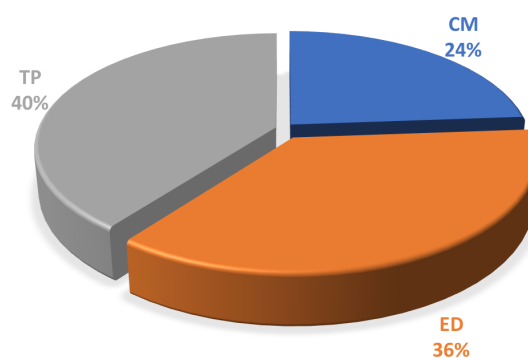
## C- Bilan enseignements

Il s'agit ici du bilan sur les actions de faces à faces pédagogiques, les travaux pratiques, dirigés ou encore les cours magistraux.

Années	2012-13	2012-14	2014-15	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
heures <sub>eqTD</sub>	≈ 192	288	275	292	323	333	291	-

**TABLE II.2:** Comptabilité des heures équivalent TD réalisées.

Les charges annuelles de la table II.2 sont globalement réparties de manière homogène (figure II.1).



**FIGURE II.1:** Répartition Cours, TD et TP (eqTD) - exemple de l'année 2018-2019

# Chapitre "Collaborations Académiques et Industrielles, Financements publics, Responsabilités scientifiques"

---

De par les positionnements de l'école et du laboratoire, les collaborations industrielles ont été naturellement privilégiées, notamment à travers des contrats directs et des financements de thèse cifre. Cependant, au cours des années, des liens universitaires nouveaux se sont créés et des liens plus historiques se sont affirmés.

## A- Collaborations

Les collaborations industrielles ont été réalisées sous deux formes, les contrats directs et les encadrements de thèses. Notons que la majorité des encadrements de thèse cifre a été réalisée dans des conditions de collaborations académiques également.

### 1. Contrats directs (Collaborations industrielles) :

- **cea : "Mise en oeuvre expérimental et développement de méthodologie de mesure de propriétés thermophysiques sur matériaux réfractaires"** de 2016 à 2017 (58 000 €).  
Porteur : F. Coste, responsable scientifique : M. Dal  
Implication : M. Dal 45%, F. Coste 45%, M. Schneider 10%.
- **Timet : "Amélioration de la méthodologie de mesure de propriétés thermophysiques (tension de surface) sur alliages de titane - formation des collègues à la méthode"** de 2018 à 2019 (2\*20 000 €).  
Porteur : M. Schneider, responsable scientifique : M. Dal et M. Schneider  
Implication : M. Dal 45%, F. Coste 10%, M. Schneider 45%.
- **edf : "Mise en oeuvre expérimental de moyen de mesure de température et de visualisation à travers le plasma en soudage à l'arc TIG"** en 2015 (20 000 €).  
Porteur : M. Dal, responsable scientifique : M. Dal  
Implication : M. Dal 90%, F. Coste 10%.
- **safran : Etude préliminaire à l'analyse de l'interaction laser-matière du procédé LBM - développement de modèles simples pour valider la faisabilité d'une simulation numérique complète"** de 2017 à 2018 (23 000 €).  
Porteur : M. Dal, responsable scientifique : M. Dal Implication : M. Dal 100%.

Contrats directs de financement de thèses :

- **Velan - thèse E. Abouda : Étude de revêtements durs pour la tenue à l'usure par rechargement laser dans la robinetterie nucléaire sur des fonctions de guidage et d'étanchéité** de 2014 à 2018 (355 000 €).



Porteurs et responsables scientifiques PIMM-CEA : P. Peyre/P. Aubry et M. Dal.

Implication personnelle : expertise en simulation numérique et en procédé de projection laser.

- **CEA - thèse L. Gouton : Formation par traitement de surface par laser d'une couche de chromine sur un alliage base nickel pour limiter le relâchement des cations en circuit primaire.** de 2012 à 2015 (45000 €).

Porteurs et responsables scientifiques PIMM : V. Favier, P. Peyre et M. Dal.

Implication personnelle : expertise en simulation numérique.

## 2. Contrats d'accompagnements de thèses cifre (Collaborations industrielles et académiques) :

- **Safran - thèse E. Ferreira : Influence des régimes d'interaction laser-matière sur la stabilité et le rendement du procédé de fabrication additive par dépôt de poudre en Inconel 718** de 2017 à 2020 (142 000 €).

Porteurs et responsables scientifiques PIMM : P. Peyre et M. Dal.

**Collaborateur académique : C. Colin (Centre des Matériaux)**

Implication personnelle : expertise en simulation numérique et validation expérimentale, réflexions sur le procédé de fabrication additive DMD.

- **Safran - thèse Y. Mayi : Compréhension et simulation des phénomènes affectant la fabrication en SLM** de 2017 à 2020 (112 000 €).

Porteurs et responsables scientifiques PIMM : P. Peyre et M. Dal.

**Collaborateurs académiques : M. Bellet et Gildas Guillemot (Cemef)**

Implication personnelle : montage de dossier cifre, expertise en simulation numérique et validation expérimentale, analyse de la physique du procédé de fabrication additive SLM.

- **Air Liquide - thèse K. Ayfi : Simulation thermomécanique de l'ouverture de brèche dans les canalisations de transport d'oxygène pur** de 2017 à 2020 (50 000 €).

Porteur : F. Coste, Responsables Scientifiques PIMM : P. Lorong et M. Dal.

**Collaboratrice académique : P. Domingo (Laboratoire Coria)**

Implication personnelle : montage de dossier cifre, expertise en simulation numérique multiphysique.

Encadrement partiel de thèse sans financement :

- **CEA - thèse L. Carvalho : Etude de l'interaction laser surface pour le développement de procédé de décontamination de surfaces métalliques avec fissures micrométriques par ablation laser** de 2015 à 2019.

Implication personnelle : expertise et encadrement en simulation numérique.

## B- Financements publics

### Porteur de :

- **Projet ANR-DFG « FastLas » (Franco-Allemand) : "Etude numérique et expérimentale pour l'amélioration du soudage laser du cuivre"** débuté en avril 2020 (600 000 €)

Porteur : M. Dal (France) et R. Weber (Allemagne).

Responsables scientifiques (laboratoire PIMM) M. Dal.

Participants : PIMM, IFSW.

Implication personnelle : Montage du projet. En charge de la partie simulation numérique du soudage laser grande vitesse et grande puissance. Partie expérimentale en Allemagne.

- **Projet Carnot « Ideal » : "Etude de l'effet des formes de faisceaux lasers sur la fabrication additive"** (Terminé en 2015) (24 000 €)

Porteur : M. Dal (France)

Responsables scientifiques (laboratoire PIMM) M. Dal.

Participants : PIMM.

Implication personnelle : Montage du projet et réalisation de l'étude.

### Participation à :

- **Projet ANR « 3D-SLS »** : 591 809 € de 2015 à 2019.

Porteur : C. Barres.

Responsables scientifiques (laboratoire PIMM) G. Régnier, E. Monteiro et M. Dal.

**Participants : CETHIL, IMP, SOLVAY Rhodia operations.**

Implication personnelle : Participation au montage du projet (sur la partie laser), mesure et modélisation de l'interaction laser-polymère.

- **Projet IRT « FACT »** : 6 206 000€ de 2017 à 2020.

Porteur : V. SCHNITZLER-DUVAL (IRT)

Responsables scientifiques (laboratoire PIMM) G. Régnier et M. Dal.

**Participants : Universitaires LTN, PIMM et Industriels : AIRBUS, ARKEMA, DAHER, DE-DIENNE, EOS, LIEBHERR AEROSPACE TOULOUSE, SAFRAN, ZODIAC ENGINEERING, CANOE.**

Implication personnelle : Mesure et modélisation de l'interaction laser-polymère.

## C- Responsabilités scientifiques

Au cours des mes différentes actions de recherche, plusieurs opportunités de responsabilités scientifiques se sont présentées à moi.

En 2016, suite à de fortes interactions historiques (sur le soudage) et plus récentes (sur la combustion des



métaux) entre Air Liquide et l'équipe Laser du laboratoire PIMM (anciennement le LALP), une perspective de laboratoire commun a été envisagée. Les thématiques partagées concernent les sujets les plus porteurs du moment, i.e. la fabrication additive et la sécurité oxygène (combustion). Durant environ 18 mois, j'ai eu l'occasion de participer au montage de cette entité, notamment sur le cadrage scientifique. Il a pu être officialisé en novembre 2018 sous le nom Matheo et dans laquelle est incluse la thèse de K. Ayfi décrite précédemment.

En 2017, a été inaugurée la plateforme Additive Factory Hub (AFH), qui centralise dans la région Ile-de-France (Saclay) les activités d'un grand nombre de partenaires en terme de fabrication additive. L'ensam étant un des dix membres fondateurs et le PIMM ayant une certaine expérience sur le sujet, nous avons été mis à contribution pour la création et la gestion de cette structure. Pour ma part, mon implication a été essentiellement sur la définition de la feuille de route pour l'intégration de la simulation numérique (WP5) dans ce contexte très industriel.

En 2018, l'animation de la thématique scientifique Procédés Innovants de la Fédération Francilienne de Mécanique - Matériaux m'a été proposé en doublon avec Vincent Guipont (CdM). Les tâches qui nous incombent sont doubles, premièrement nous participons aux comités de sélection des financements annuels "Coup de Pouce", pour les jeunes chercheurs. Deuxièmement, nous devrions organiser des journées thématiques relatives à notre domaine. Cependant, nous n'avons pas encore eu l'occasion de construire ce type d'événement.

En 2019, suite au départ en retraite de P. Gilormini, j'ai accepté l'animation d'une des 4 actions phares du laboratoire "Approche intégrée en multiphysique" en collaboration avec Eric Monteiro. Ces actions phares étant assez récentes, nous avons pu reprendre la démarche du début, notamment en faisant une évaluation concrète des membres du laboratoire concernés par cette thématique. Cela en vue d'en présenter les contours et les perspectives en Séminaire Externé 2020 (regroupement des membres du laboratoire hors du l'école environ tout les deux ans).

## Conclusions et perspectives

---

Durant ces 8 années passées au laboratoire PIMM de l'ensam, comme tout maître de conférences, j'ai eu l'occasion de mener de front diverses activités aussi bien de recherche, de pédagogie ou d'administration.

Du point de vue de la recherche, mes activités ont été réalisées selon deux axes principaux, la simulation - validation de procédés lasers et la mesure de propriétés thermophysiques de métaux liquides. Ces travaux ont été effectués en partie de manière individuelle mais aussi en collaboration avec des collègues permanents ou doctorants. Ils ont fait l'objet de plus de quinze articles (plus trois en cours de rédaction) et on permis une participation à, en moyenne, une conférence internationale par an.

Nous avons montré dans le manuscrit que si les résultats actuels en terme de simulation, de validation et de mesure sont satisfaisants, certaines choses restent à faire. De manière générale, moyennant les bonnes hypothèses, ils répondent tout de même aux questions industrielles et physiques dans un contexte particulier. Citons, par exemple, la simulation purement thermique de la fabrication par projection de poudre, qui permet l'obtention du champ thermique global de manière satisfaisante. Nous avons également présenté les travaux de simulation de la fabrication additive sur lit de poudre (SLM ou LPBF). A notre connaissance, il s'agira, une fois terminée, de la version la plus aboutie de la simulation de l'interaction laser-matière à notre échelle (mésoscopique) pour laquelle certaines limites sont cependant observées (hypothèse sur la poudre, gestion des fortes pénétrations, éjections, ...). Néanmoins, ce modèle encore incomplet à ce jour (thèse en cours) permet déjà d'étudier certaines questions relatives au procédé telles que l'origine du phénomène de dénudation ou la cause de certaines instabilités liées aux réflexions multiples dans le capillaire de vapeur (travail et publication en cours). Ce dernier sujet a d'ailleurs été la base de construction d'un projet ANR-DFG (franco-allemand), qui porte sur l'étude numérique et expérimentale du soudage laser de cuivre. Ce cas, assez complexe, autorise assez peu d'hypothèses (forte variation des propriétés avec la température, multireflexions, ...) et nous devons réaliser un modèle particulièrement complet afin d'atteindre un niveau de représentativité souhaité (simulation des instabilités hydrodynamiques).

Une autre limite de cette démarche de recherche est l'envergure du problème, qui demande un investissement humain sur le numérique, la physique et l'expérimental. Le meilleur exemple concerne la mesure de diffusivité thermique qui ne peut être réalisée pour le moment qu'à cause d'un manque humain. A minima, le recrutement d'un doctorant ou d'un post-doctorant serait nécessaire pour faire avancer l'étude. Dans le meilleur des cas, le recrutement d'un permanent, actif à 100 % sur ce domaine, serait nécessaire à un maintien pérenne de cette activité.

Concernant la pédagogie, mes actions ont été réparties sur trois niveaux, l'administration et la gestion, la construction et le face à face pédagogique. Le bilan horaire annuel de ma charge d'enseignement et sa répartition entre CM, TD et TP, témoignent de mon implication pour le transfert direct de connaissance. Néanmoins les actions de construction de séquence pédagogique et l'administration de formation (en partie) présentent, à mon

sens, un intérêt certain pour l'équilibre d'un enseignant-chercheur.

En termes de collaborations, la présentation des différentes actions menées ces dernières années montrent globalement de très forts liens industriels qui ont essentiellement participé au financement de ma recherche. Les collaborations académiques interviennent essentiellement dans le cadre de co-encadrement de thèses. La dernière collaboration académique en date est celle qui a débuté en avril 2020 avec l'IFSW, à l'université de Stuttgart, que nous chercherons à maintenir sur différents sujets, notamment sur la mesure de propriétés. De plus, suite aux directions communes que nous avons prises, de nouvelles collaborations avec l'Université de Bretagne Sud sont à prévoir. En effet, sans succès pour le moment, nous avons dernièrement cherché un co-financement de thèse sur le sujet de la mesure de diffusivité thermique.

Au regard de ce qui a été présenté dans ce manuscrit, mes perspectives en termes d'activités de recherche sont présentées sur une échelle de temps divisée en trois, i.e. les éléments déjà en cours et qui présenteront des résultats dans les quatre années à venir, les sujets que je souhaite démarrer dans les trois ou quatre ans et les étapes à plus long terme et plus incertaines. Associées à cela, car pour un enseignant - chercheur ces aspects ne sont jamais parfaitement séparés, quelques lignes sont ajoutées sur mes perspectives personnelles en termes de pédagogie, de management ainsi que sur les moyens de valorisations des travaux menés dans mon environnement.

## A- Aspect recherche

De manière générale, mon objectif à court et moyen terme est la mise en place de manière généralisée, pour les applications lasers, du triptyque énoncé précédemment "simulation - validation - mesure de propriétés". En effet, ce dernier me semble être une philosophie efficace pour accroître la qualité et donc l'utilité finale d'une simulation. Cela permettrait d'avoir une démarche numérique auto-consistante (très peu d'hypothèses), et donc d'augmenter les activités de simulation de procédés au sein du laboratoire. Néanmoins, pour ce faire, certains points techniques restent néanmoins à étudier :

### 1. Court terme (en partie en cours) – résolu dans les 3 ou 4 ans

- *Multi-réflexions (ANR) - effet sur l'absorptivité optique géométrique et ondulatoire :*

Dans de nombreuses applications lasers, la zone d'interaction laser – matière se déforme sous l'effet de la pression de recul liée à la vaporisation du métal liquide. Cette modification de forme entraîne un piégeage et une redistribution spatiale du faisceau modifiant grandement le dépôt d'énergie et donc les conséquences sur la pièce. Généralement négligée ou approximée, car assez difficile à intégrer numériquement, cette notion est cependant cruciale à une définition correcte d'une simulation. Dans le cadre d'une thèse CIFRE nous avons commencé à regarder et à implémenter cet aspect (thèse Y. Maayi) en couplant manuellement, de l'optique géométrique et de la gestion de frontière libre Lagrangienne



(ALE). Les premières observations physiques en termes d'absorption d'énergie et de stabilité de procédé sont extrêmement prometteuses, cependant les méthodes utilisées ne sont pas optimales en temps et en configuration géométrique. En effet, une formulation ondulatoire simplifiée ou du tracé de rayon couplé, directement ou indirectement, à une gestion Eulerienne d'interface permettrait une représentation plus généralisable (forte pénétration du capillaire de vapeur). Cette démarche sera réalisée dans le cadre d'un projet anr FASTLAS débutant au 01/04/2020.

- *Champ de vitesse du gaz couplé aux méthodes Eulériennes (ANR) :*

Comme énoncé précédemment certaines applications font apparaître le phénomène de vaporisation de la phase liquide. Cette vaporisation a généralement lieu dans un capillaire de vapeur relativement fin (quelques centaines de micromètres) provoquant des vitesses de gaz assez élevées (100 à 500 m/s). Il est observé expérimentalement que le gaz tend, par cisaillement, à entraîner le liquide de surface, provoquant instabilités hydrodynamiques et projections. Numériquement ce phénomène est assez difficile à maîtriser car les méthodes numériques, utilisées en général pour traiter les fortes déformations de frontières libres, sont Euleriennes (Levelset ou Phase field). Il est connu que ces interfaces « diffusent » l'information dans leur épaisseur réduisant, par exemple, la justesse du transfert de contrainte visqueuse. Nous proposons d'étudier cela aussi dans le cadre du projet FASTLAS.

- *Etude de matériaux particuliers type cuivre – aluminium (ANR) :*

Le traitement laser de matériaux tels que les cuivres ou les aluminiums est assez particulier dans la mesure où ils ont de hautes conductivités thermiques et de faibles absorptions aux longueurs d'ondes conventionnelles dans ce genre d'application (IR). Il est observé expérimentalement (IFSW et PIMM) que de fortes instabilités apparaissent dans la plupart des cas, sans que les origines de ces phénomènes ne soient encore parfaitement bien comprises. Ceci est le coeur du projet Fastlas dans lequel nous couplerons des moyens numériques optimisés (cf. points précédents) à des moyens expérimentaux de pointes (Radiographie X in-situ et imagerie rapide). Le couplage des deux devrait permettre de valider ou d'infirmer les hypothèses qu'ont les deux équipes sur le sujet.

- *Écoulements avec phases dispersées méthode Euler – Euler ou Lattice Boltzmann (thèse J. Guy) :*

Dans le cadre de la fabrication additive laser, l'apport de matière se fait en général par l'intermédiaire de poudres, notamment avec le procédé LMD (Laser Metal Deposition). Dans la plupart des cas de la littérature (nous compris – thèse E. Feirrer) la poudre est traitée de manière Lagrangienne c'est-à-dire particulaire. Si cette démarche est très efficace et réaliste pour une simulation de la partie amont du procédé seule, le jet (gaz + poudre), elle l'est beaucoup moins lorsqu'il s'agit de coupler la partie « jet de poudre » à la simulation thermo-hydrodynamique de la pièce. Dans le cadre d'une thèse débutée fin 2019 (J. Guy) nous sommes actuellement en train de tester la possibilité de traiter un jet de LMD comme étant un écoulement avec phase dispersée par l'intermédiaire de méthodes de type Euler-Euler et Lattice Boltzmann. Dans ces dernières, la phase dispersée, la poudre, est simulée/traitée de manière continue et peut donc être couplée à un modèle de pièce bien plus facilement.

- *Mesure et observation du champ de vitesse : PIV - Striscopie :*

Un des éléments de nos simulations, encore difficile à valider aujourd'hui dans notre environnement,



reste le champ de vitesse des fluides étudiés, i.e. le métal liquide ou la vapeur en soudage / SLM ou encore les écoulements gazeux dans une buse de projection de poudre. Pourtant des méthodes existent et peuvent être adaptées à nos installations telles que la PIV (Particle Image Velocimetry) basée sur du suivi de particules fines incluses dans l'écoulement à étudier ou la strioscopie (ou ombroscopie pour les faibles vitesses) basée sur la variation d'indice optique d'un milieu subissant de forts gradients de vitesse. Notons que cette dernière a déjà été mise en œuvre au sein de l'équipe mais jamais pour de la validation de simulation.

- *Aspect exothermique de l'oxydation ou de la combustion – méthodes inverses :*

Dans le cadre des travaux actuels sur la simulation de la combustion, une partie encore non parfaitement traitée aujourd'hui, est l'apport de chaleur généré par l'oxydation des métaux. Sa particularité pour les métaux ferreux ou base nickel est qu'elle aurait lieu plutôt au sein de la phase liquide contrairement aux gaz ou à l'aluminium par exemple. La faible quantité de littérature sur le sujet et le caractère essentiel de ce phénomène, nous mène à envisager, dans le cadre de travaux avec Air Liquide (thèse K. Ayfi), des moyens d'investigation particuliers. A cours terme, nous prévoyons donc de proposer et de tester une méthode de mesure de la localisation et de la quantité de chaleur produite par un volume élémentaire de matière (poudre) s'oxydant dans des conditions particulières. Notre idée, basée sur de premières expériences, serait d'utiliser des simulations numériques simples couplées à des expériences élémentaires afin d'obtenir ces données par l'intermédiaire de méthodes inverses (identification paramétrique ou estimation de fonction). Cette thématique fera l'objet d'une soumission de projet ANR en 2020.

## 2. Moyen terme – démarré dans les 3 ou 4 ans

- *Aspect chimique détaillé de la combustion – méthode inverse :*

Ce second volet sur la combustion porte sur la description complète de la réaction chimique d'oxydation ou de combustion. Si l'identification de l'apport thermique peut être intéressante à court terme, il n'en reste pas moins que le phénomène d'oxydation est essentiel dans les applications lasers et qu'en l'état actuel des choses nous n'avons pas les compétences pour la décrire complètement (cinétiques chimiques, diffusion d'O<sub>2</sub>, ...). Pour parer à cela, nous proposons depuis quelques années des projets ANR collaboratifs dans lesquels nous serions entourés par des organismes compétents dans le domaine de la combustion (laboratoire CORIA et Onera).

- *Simulation complète procédé LMD (buse et pièce) :*

Le procédé de fabrication additive par projection de poudre est largement utilisé dans l'industrie, que ce soit pour la fabrication ou pour la réparation. Néanmoins, aucun modèle à ce jour ne représente le procédé complet (gaz + poudre + pièce). Souvent, seule la pièce est simulée or nous montrons aujourd'hui (thèse E. Feirrer - Safran) que la buse est un élément particulièrement influent sur les formes fabriquées, la métallurgie ou les effets mécaniques résiduels. Afin d'éviter les couplages indirects (deux logiciels ou méthodes numériques différentes) entre deux simulations très différentes, nous souhaiterions proposer ce type de simulation couplée. Notre démarche a été dans un premier temps de lever la difficulté liée au transfert d'information entre un modèle de poudre Lagrangien (discret) et un modèle de pièce Eulerien en



utilisant la méthode continue évoquée précédemment (Euler-Euler ou Lattice Boltzmann). Une fois cette étape validée, les modèles de pièces étant déjà plutôt communs et ne présentant pas de difficulté autre que la gestion de la frontière libre (liquide – gaz), nous serons en mesure de proposer une telle simulation (fin de thèse de J. Guy), bien plus prédictive que celles présentes aujourd’hui dans la littérature.

- *Simulation de la SLM avec poudre :*

La fusion laser de lit de poudre est un procédé extrêmement prometteur et particulièrement étudié aujourd’hui. A notre échelle d’étude, intermédiaire ou mesoscopique, notre objectif est de proposer des simulations pour améliorer la compréhension des phénomènes locaux du procédé, i.e. de la zone d’interaction laser-matière. Or, pour ce faire deux points de vue sont envisageables et se différencient sur la manière de traiter la poudre, soit chaque grain est simulé physiquement, soit un domaine continu à propriétés équivalentes est considéré. Nous sommes actuellement en train de proposer une simulation du second cas et observons que l’hypothèse d’homogénéisation n’est pas forcément parfaitement applicable dans ce cas. De plus, cette hypothèse censée faciliter la description physique du procédé fait intervenir des zones éloignées de la réalité expérimentale et pour lesquelles les hypothèses sont parfois difficiles à justifier (point triple, liquide – solide – poudre par exemple). Pour cette raison, nous sommes actuellement en train de développer un modèle SLM avec représentation physique de la poudre. Ce type de modèle existe aujourd’hui cependant ils ne sont en général que partiels (pas de gaz par exemple) et notre ambition est de faire en sorte de pouvoir simuler des phénomènes tels que les éjections de particules pas encore bien comprises aujourd’hui. Pour ce faire l’accent sera mis sur la représentation de la poudre (Eulerien) et du gaz (vapeur et argon).

- *Ajout de la partie mécanique du solide (contraintes et déformations résiduelles et choc laser) :*

Il est bien connu que les applications lasers ont tendance à produire des effets thermiques assez violents (forts gradients) et qu’en conséquence des effets mécaniques résiduels (contraintes) importantes sont observés. Jusque maintenant notre domaine d’étude est plutôt centré sur la thermo-hydrodynamique des procédés, cependant, il paraît évident qu’à moyen terme nous devons inclure de plus en plus de mécanique du solide dans nos simulations. Cette démarche, un peu transitoire, est en train de se mettre en place grâce aux travaux communs avec Air Liquide dans lesquels le point de vue mécanique est essentiel (simulation d’ouverture de brèche dans les canalisations d’oxygène pur, thèse K. Ayfi). Notre démarche est actuellement en cours de validation avec nos outils historiques (Comsol Multiphysics©). Deux applications sont essentiellement visées, la fabrication additive pour laquelle les effets mécaniques se cumulent et sont donc essentiels à simuler, et le choc laser, une activité du groupe présentant un fort potentiel de simulation (mécanique essentiellement) et pour laquelle mon implication n’est que très faible.

- *Autres procédés lasers type dépôt de fil – perçage – découpe :*

Certains modèles en cours de réalisation actuellement ont pour vocation d’être auto-consistants et prédictifs grâce à une description physique la plus générale possible. Par conséquent, il serait pertinent d’appliquer ces descriptions à des procédés, récents tels que la fabrication additive avec fusion de fil par laser, ou moins récents tels que le perçage ou la découpe mais qui ne semblent pas encore parfaitement maîtrisés numériquement dans la littérature. Notons que cette démarche est couplée aux perspectives de



développement d'activité expérimentale du groupe.

- *Méthode de lévitation acoustique :*

Concernant les actions sur les mesures de propriétés thermo-physiques (ou fluides) des matériaux métalliques fondus, nous avons observés les limites de certaines configurations expérimentales (goutte posée ou lévitation aérodynamique) et souhaiterions envisager des essais sur une installation de lévitation acoustique. Cette action, dont le financement est acté et accordé par le laboratoire, n'est encore qu'aux premières étapes mais présente de forts atouts. En effet, c'est une action conjointe entre plusieurs équipes du laboratoire complémentaires sur ce sujet. De plus cette méthode déjà observée dans la littérature, semble imparfaite sur certains points (oscillations, champs de force non sphérique, . . .) que nous devrions pouvoir maîtriser en construisant et optimisant le système de lévitation. Ce type d'installation sans contact et sans effet mécanique parasite (jet de gaz) serait un atout majeur et inédit dans la démarche de mesure des propriétés.

- *Mesure de diffusivité thermique (conductivité et chaleur massique) :*

Nos activités sur la mesure de tension de surface, de masse volumique et de viscosité ont pu être réalisées avec peu de moyens matériels et humains, néanmoins nous arrivons à un stade où il devient essentiel d'avoir un personnel à long terme sur le sujet. En effet, pour les propriétés thermiques (conductivité et chaleur massique) les développements sont plus complexes et donc plus coûteux en temps humain. Nous souhaiterions donc dans les années à venir, un financement de thèse sur ce sujet (financement demandé en 2020 sur ce sujet en collaboration avec l'Université de Bretagne Sud).

- *Mesure de forme par goniomètre IFSW – radiographie X in situ :*

La démarche affichée jusque maintenant porte sur une combinaison de simulations numériques et de validations expérimentales. Certains observables sont aujourd'hui assez bien maîtrisés (température, forme externe de zone fondue 2D) et d'autres semblent accessibles au regard de la littérature (vitesse) et des perspectives d'évolution de nos installations expérimentales. Une autre information est essentielle à la validation de nos modèles mais reste cependant assez difficile à atteindre, la forme tridimensionnelle de la surface du liquide lors d'une opération de soudage, de fabrication additive (SLM), de perçage ou de découpe. En effet, l'interface liquide – gaz subit le phénomène de vaporisation et donc de pression de recule. Elle est donc défléchie à l'intérieur du liquide formant le capillaire de vapeur. Couramment étudiée dans la littérature, la physique du capillaire présente cependant assez peu d'observations expérimentales. Nous souhaiterions donc collaborer avec des chercheurs compétents dans ce domaine afin de palier à ce manque évident. Une équipe avec laquelle nous sommes déjà en discussion sur ce sujet vient de l'IFSW (Stuttgart) et ayant déjà un projet ANR – DFG commun, nous souhaiterions poursuivre notre collaboration sur cette thématique. Essentiellement expérimentateurs, ils ont développé deux moyens intéressants, une méthode de reconstruction d'image 3D par multi-polarisation d'images issues d'une caméra rapide et une technique d'extrapolation 3D de radiographie X in situ.

### 3. Long terme plus de 4 ans

- *Amélioration des performances numériques :*



Au regard des perspectives de simulation numérique visées dans les parties précédentes, il paraît évident que nos besoins de ressources informatiques vont augmenter. Actuellement, nous ne faisons qu'augmenter les dimensions des machines de calcul (passage 16 CPU à 72 CPU). Cependant cette démarche ne répond que partiellement à nos besoins à long terme. Multiplier le nombre d'unités de calcul permet de traiter les problèmes actuels légèrement plus rapidement ou de multiplier les développements en parallèle. Cependant, nos modèles les plus complexes restent sur des temps de calcul assez limitants (plusieurs semaines ou mois). Deux possibilités s'ouvrent donc à nous :

- Utiliser une autre méthode numérique de base telle que la méthode des volumes finis largement utilisée et reconnue pour la thermo-hydrodynamique.
- Faire appel à d'autres architectures matérielles comme le calcul GPU beaucoup plus efficace mais nécessitant un codage manuel, ce qui n'est pas forcément notre ambition. Ce choix étant assez lourd de conséquence sur la suite des actions de recherche, il sera réalisé après des démarches et tests plus poussés sur le sujet.

## B- Aspect managérial

Suite à un accroissement de ma participation à l'encadrement de doctorants les quelques dernières années, j'ai pu prendre conscience et goût à la constitution, à l'organisation et à la gestion de ce qui ressemble à une petite équipe de recherche (5-6 doctorants). En effet, sur la thématique de la simulation numérique, plutôt sous ma responsabilité dans l'équipe, il y a actuellement deux thèses complètes et trois autres partielles, plus quelques actions ponctuelles d'autres personnels du laboratoire. Les aspects de synergie naturelle ou à développer entre les doctorants ainsi que l'orientation des actions présentes en fonction des besoins futurs ont été particulièrement passionnants, efficaces et valorisants ces trois dernières années.

Par conséquent, dans un futur plus ou moins proche je souhaiterais, si l'occasion m'en est donnée, participer à la coordination ou à la constitution d'une équipe de recherche, soit sur les applications lasers, soit sur la simulation numérique.

## C- Start up – labo

Une autre de mes perspectives en termes de projet concerne la valorisation des travaux de recherche. En effet, aujourd'hui, les moyens de valorisation sont, soit purement scientifiques à travers les publications dans journaux et communications orales, soit orientés vers l'industrie lors de réalisation de contrats directs. En ce qui me concerne, ces derniers restent cependant assez « confidentiels » et de portée scientifique assez faible, en d'autres termes, ils n'ouvrent ni à une reconnaissance particulière de l'industrie ni à de potentielles publications. Associé à cela, dans la communauté, un troisième moyen de valorisation est de plus en plus présent. Il s'agit de la création de « Start up – Labo », qui sont de petites structures dans lesquelles, des membres d'un laboratoire valorisent le travail de recherche qu'ils ont mené en amont. Il ne s'agit pas ici de pénaliser les activités du laboratoire en entrant dans une démarche concurrentielle mais plutôt de synergie et de complémentarité. Dans ma vision des choses, une telle structure aurait deux intérêts majeurs au regard du fonctionnement actuel.

Premièrement, les produits numériques que nous construisons aujourd'hui sont principalement utilisés pour améliorer la compréhension physique d'un procédé. Un industriel travaillant avec nous aujourd'hui n'est que très rarement propriétaire de la simulation qui a été développée. Si c'est le cas, les modèles sont en général assez complexes et pas forcément très lisibles ou utilisables par un industriel. Ce que nous proposerions donc, serait une étape supplémentaire de transfert. En effet, l'outil que nous utilisons la plupart du temps (Comsol Multiphysics©) permet, à partir d'une simulation, la construction d'une application (un exécutable) type "métier" dans laquelle seuls quelques variables, paramètres ou conditions sont modifiables (à définir au cas par cas). L'intérêt étant que l'industriel n'ait pas accès aux détails de la simulation (maillage, solver, formulations faibles, ...) préservant notre savoir-faire et rendant l'outil plus robuste et « diffusable » en production. Cette démarche, pourtant essentielle à la valorisation et à la diffusion d'actions de recherche n'est aujourd'hui pas réalisé car potentiellement coûteuse en temps.

Deuxièmement, une telle structure pourrait permettre le développement techniques d'outils pour la création d'application ou pour l'optimisation des calculs. Dans le contexte actuel, notre dépendance logicielle est assez forte et potentiellement gênante. Comme annoncé dans les actions de recherche à long terme, certains développements purement « logiciels » ou « techniques » (changement de logiciel ou développement pour calcul GPU) seront à mener. Cependant, mon rythme en tant qu'enseignant chercheur ne me permet pas de libérer se temps pour appréhender ces démarches. Dans une petite structure « Start up – labo », un personnel déjà compétent, partiellement ou complètement dédié à cette tâche permettrait une action rapide et efficace sur ce sujet.

Notons, de plus, que le personnel impliqué dans une telle structure pourrait avoir comme action complémentaire de faire du conseil, soit pour le développement de simulations particulière, soit de transfert suite à un travail réalisé au sein du laboratoire. Typiquement, un doctorant pourrait intégrer cette structure après sa thèse, durant 6 mois ou un an, pour transmettre son travail et ses connaissances à l'entreprise commanditaire.

## D- Aspect pédagogique

Concernant la pédagogie, mis à part le maintien et l'amélioration continue de mes enseignements et activités actuels, une de mes perspectives, serait de (re-)proposer un enseignement - formation de chaudronnerie. En effet, suite à un défaut de candidat, une l'option de « Chaudronnerie » de l'école, dont j'avais la charge, a malheureusement été arrêtée. Après discussion avec le Syndicat National de Chaudronnerie et Tuyauterie et quelques entreprises du secteur (à travers les apprentis), il s'avère que le besoin reste cependant bien présent. Les entreprises sondées seraient même potentiellement intéressées par une participation directe (pédagogique ou financière) à ce genre de formation. Selon moi deux formats se prêteraient particulièrement à cette démarche :

- Une option du parcours ingénieur par apprentissage, qui a pour avantage une plaquette pédagogique ainsi qu'une accréditation CTI déjà existante. De plus, malgré les quelques années d'arrêt, les enseignants restent identifiés et potentiellement moteurs.
- Un Master spécialisé, qui lui est soumis à la difficulté d'être inexistant et donc à créer complètement aussi

bien pédagogiquement d'administrativement. Cependant, ce type de formation, est à ma connaissance, plus malléable et perméable aux besoins, financements et participations industriels rendant l'exercice potentiellement plus confortable. De plus, si une telle formation dans ce format n'existe pas encore aujourd'hui, la plaquette pédagogique de l'ancienne option serait une base non négligeable.

Dans les deux cas, la difficulté serait bien-sûr la visibilité d'une telle formation aussi bien pour l'industrie que pour les étudiants. Une démarche proactive sur ce sujet serait donc à mener en premier lieu.

En complément, nous sommes actuellement en discussion pour le montage d'un erasmus avec l'université de Patras (Grèce). En l'état actuel des choses, une confirmation de l'adéquation des deux formations cibles est en cours et le transfert d'étudiant ne sera effectif qu'en septembre 2020 ou 2021. Cette ouverture de la pédagogie à l'internationale présente pour moi un objectif de carrière.



## Annexe Curriculum Vitae



## État civil

---

Nom de famille : **DAL**

Prénom : **Morgan**

Date de naissance : 22/11/1984 (35 ans)

Grade : Maître de conférence (ech 5)

Établissement d'affectation : ENSAM Centre de Paris

### Coordonnées personnelles :

27 Cours du Buisson, 77186, Noisiel

06.13.97.21.53

[morgan.perso@gmail.com](mailto:morgan.perso@gmail.com)

### Coordonnées Professionnelles :

Group Laser, Laboratoire PIMM,  
ENSAM, 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013, Paris.

01.44.24.61.43

[morgan.dal@ensam.eu](mailto:morgan.dal@ensam.eu)

## Parcours universitaire et professionnel

---

### Diplômes

**2011 Doctorat** en Science de l'Ingénieur - Université de Bretagne-Sud, spécialité simulation numérique du soudage. Mention très honorable.

« *Simulation magnéto-thermo-hydrodynamique du soudage à l'arc TIG et estimation de l'avancée d'un front de fusion* »

**2008 Master** Génie des Systèmes et Procédés Industriels - Université de Bretagne-Sud, spécialité thermique - énergétique (double Recherche + Professionnel).

**2006 Licence** Sciences de l'Ingénieur, Université de Bretagne-Sud, spécialité thermique - énergétique.

**2004 D.U.T.** Mesures Physiques - I.U.T. S<sup>t</sup> Nazaire.

### Fonctions

**2012-2020 Maître de conférence**, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – Laboratoire PIMM

**2011-2012 demi ATER**, Université de Bretagne Sud – Laboratoire LIMATB

**2008-2011 Doctorant**, Université de Bretagne Sud – Laboratoire LIMATB

+ divers stages en laboratoire : 2006 - CSTB, 2007 et 2008 LTEE (UBS)

## Activités de recherche et d'animation de la recherche

---

### Domaine de compétences

- ⇒ Simulation numérique des applications laser continues (CWL)
- ⇒ Couplage phénomènes thermiques et fluides
- ⇒ Interaction laser matière
- ⇒ Soudage, Fabrication Additive Laser
- ⇒ Mesure de propriétés thermophysiques des métaux liquides (tension de surface, viscosité, ...)
- ⇒ Méthode inverse, estimation de paramètre et de fonction

### Encadrement doctoral et scientifique

Participation à l'encadrement de 5 thèses :

**V. Gunenthiram** : Encadrement à **35%** - Direction : P. Peyre (30%) et co-encadrement : M. Schneider (35%) - Début : 1/10/2014      Fin : 15/03/2018

**E. Abouda** : Encadrement à **30%** - Direction : P. Aubry (40%) et co-direction : P. Peyre (30%) - Début : 1/12/2014      Fin : 16/02/2018



E. Ferreira : Encadrement à **30%** - Direction : P. Peyre (40%) et co-direction : C. Colin (30%) Début : 06/06/2017 Fin : 06/06/2020

K. Ayfi : Encadrement à **40%** - Direction : P. Lorong (30%) et co-direction : P. Domingo (30%) - Début : 01/12/2017 Fin : 30/11/2020

Y. Mayi : Encadrement à **40%** - Direction : P. Peyre (30%) et co-direction : M. Bellet (30%) - Début : 15/12/2017 Fin : 14/12/2020

J. Guy : Encadrement à **50 %** - Direction : P. Peyre (50%) – Début 15/10/2019 Fin : 1/10/2022

Encadrement de 8 stages de Master recherche :

Luc Fourcaud, (Master Magis) – Février 2014 à Juin 2014

Romain Semenol, (Master MAGIS) – Février à Juin 2015

Martin Ducas, (co-encadrement), (Master MAGIS) – Février à Juin 2015

Zarha Jalouli, (Master MAGIS) - Février à Juin 2016

Soufiane El Hilali, (Master MAGIS) – Février à Juin 2016

Achraf Kessentini, (Master MAGIS) - Octobre 2018 à Juin 2019

Mohammad Zarbini, (Master MAGIS) - Octobre 2018 à Juin 2019

Julien Daligaut, (Master MAGIS) – Octobre 2019 à Septembre 2020

## Responsabilités scientifiques

---

### Contrats Industriels :

- Contrats d'accompagnements de thèses cifre :

Safran (thèse E. Ferreira) : 142 000 € de 2017 à 2020. Porteurs et responsables scientifiques : P. Peyre, M. Dal et C. Colin (Centre des Matériaux)

Safran (thèse Y. Mayi) : 112 000 € de 2017 à 2020. Porteurs et responsables scientifiques : P. Peyre, M. Dal et M. Bellet (Cemef)

Air Liquide (thèse K. Ayfi) : 50 000 € de 2017 à 2020. Porteur : F. Coste, Responsables Scientifiques : P. Lorong, M. Dal et P. Domingo (Laboratoire Coria)

- Contrats directs de financement de thèses (salaire doctorant inclus) :

Velan (thèse E. Abouda) : 355 000 € de 2014 à 2018. Porteurs et responsables scientifiques : P. Peyre et M. Dal.

- Contrats directs :

cea : 58 000 € de 2016 à 2017. Porteur : F. Coste, responsable scientifique : M. Dal

Timet : 2\*20 000 € de 2018 à 2019. Porteur : M. Schneider, responsable scientifique : M. Dal et M. Schneider

edf : 20 000 € en 2015. Porteur : M. Dal, responsable scientifique : M. Dal

Safran : 23 000 € de 2017 à 2018. Porteur : M. Dal, responsable scientifique : M. Dal

### Contrats publics nationaux et internationaux :

Participation à :

Projet ANR « 3D-SLS » : 591 809 € de 2015 à 2019. Porteur : C. Barres.

Projet IRT « FACT » : 6 206 000€ de 2017 à 2020. Porteur : V. SCHNITZLER-DUVAL (IRT)

Porteur de :

Projet ANR-DFG « FastLas » (Franco-Allemand) : 600 000 €

Projet Carnot « Ideal » (Terminé en 2015) : 24 000 €

## Responsabilités liées à l'administration scientifique :

---

- 2017 - Participation au montage et à la gouvernance de la plateforme **Additive Factory Hub** (AFH <https://www.additivefactoryhub.com>) en tant que responsable ENSAM de la tâche Numérique (WP5).
- 2018 - Invitations aux réunions du comité d'organisation de l'école METTI 7 de la Société Française de Thermique (avec implication dans la construction des ateliers/cours)

- Depuis juin 2018 - Co-animateur, avec V. Guipont, de la thématique Procédés Innovants de l’F2M (Fédération Francilienne de Mécanique)
- Depuis septembre 2019 – Co-animateur avec E. Monteiro, de l’action phare du laboratoire PIMM « Approche intégrée en multiphysique »

#### Responsabilités liées à l’enseignement et à l’administration pédagogique :

- 2014 et 2015 : responsable de l’option de troisième année (cycle ingénieur) Chaudronnerie Tuyauterie du parcours apprentissage.
- de 2014 à 2016 : responsable d’OPM (Optimisation Procédés Matériaux) volume horaire de 90 heTD avec des interventions d’industriels.
- de 2016 à 2018 : responsable d’un Cas d’Etude, enseignement basé sur un projet allant de la conception à l’industrialisation. Volume horaire de 75 heTD avec 6 intervenants.
- Depuis 2019 : responsable de la filière « Mise En Forme » du Master MAGIS (2<sup>ème</sup> année)

## Annexe Publications et communications



### Revue internationale à comité de lecture

- [1] - Masson, P.L., Dal, M., Chapter: Analysis of errors in measurements and inversion, *Book: Thermal Measurements and Inverse Techniques* (2011), 565-598.
- [2] - Morgan Dal, Philippe Le Masson, MurielCarin, Estimation of fusion front in 2D axisymmetric welding using inverse method, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 55 (2012), 60-68.
- [3] - Morgan Dal, Philippe Le Masson, Muriel Carin, A model comparison to predict heat transfer during spot GTA welding, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 75 (2014), 54–64.
- [4] - Patrice Peyre, Laurent Berthe, Morgan Dal, Sébastien Pouzet, Pierre Sallamand, Iryna Tomashchuk, Generation and characterization of T40/A5754 interfaces with lasers, *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014), 1946–1953.
- [5] - M. Dal and F. Coste, Comparison of different temperature measurement methods during laser welding, *Mechatronics*, no. 10 (2015), pp. 22-26.
- [6] - M. Dal, R. Fabbro, An overview of the state of art in laser welding simulation, *Journal Optics & Laser Technology* 78 (2016) 2–14.
- [7] - E. Abouda, M. Dal, P. Aubry, T.N. Tarfa, I. Demirci, C. Gorny, T. Malot, Effect of laser cladding parameters on the microstructure and properties of high chromium hardfacing alloys, *Physics Procedia* 83 (2016), 684 – 696.
- [8] - P. Aubry, C. Blanc, I. Demirci, M. Dal, T.Malot, H. Maskrot, Analysis of nickel based hardfacing materials manufactured by laser cladding for Sodium Fast Reactor, *Physics Procedia* 83 (2016), 613-623.
- [9] - M. Dal, P. Peyre, (Special issues) Multiphysics Simulation and Experimental Validation of Aluminum Wettability on a Titanium Substrate for Laser Welding-Brazing Process, *Metals* 7, 218 (2017), 1-14.
- [10] - Patrice Peyre, Morgan Dal, Sébastien Pouzet, Olivier, Castelnau, Simplified numerical model for the laser metal deposition additive manufacturing process, *Journal of Laser Applications* 29, 2 (2017), Article number 022304.
- [11] - Valérie Gunenthiram, Patrice Peyre, Matthieu Schneider, Morgan Dal, Frédéric Coste, Rémy Fabbro, Analysis of laser–melt pool–powder bed interaction during the selective laser melting of a stainless steel, *Journal of Laser Applications* 29, 2 (2017), Article number 022303.
- [12] - P. Aubry, C. Blanc, I. Demirci, M. Dal, T. Malot, H. Maskrot, Laser cladding and wear testing of nickel base hardfacing materials: Influence of process parameters, *Journal of Laser Applications* 29, 2 (2017), Article number 022504.
- [13] - V. Gunenthiram, P. Peyre, M. Schneider, M. Dal, F. Coste, I. Koutiri, R. Fabbro, Experimental analysis of spatter generation and melt-pool behavior during the powder bed laser beam melting process, *Journal of Materials Processing Technology*, 251 (2018), 376-386.
- [14] - Remy Fabbro, Morgan Dal, Patrice Peyre, Frédéric Coste, Matthieu Schneider, and Valerie Gunenthiram, Analysis and possible estimation of keyhole depths evolution, using laser operating parameters and material properties, *Journal of Laser Applications* 30 (2018), 032410.
- [15] - M. Dal, F. Coste, M. Schneider, R. Fabbro, R. Bolis, Laser based method for surface tension and density measurements for liquid refractory metals (Nb, Ta, and W), *Journal of Laser Applications* (2019), 022604.
- [16] - Y A Mayi, M Dal, P Peyre, M Bellet, C Metton, C Moriconi and R Fabbro, Laser-induced plume investigated by finite element modelling and scaling of particle entrainment in laser powder bed fusion, *Journal of Physics D: Applied Physics* 53, 7 (2019), 075306.

- [17] - Queva A, Mayi Y, Bellet M, Guillemot G, Peyre P, Dal M, Moriconi C and Metton C, Thermo-mechanical simulation of track development in the Laser Beam Melting process - Effect of laser-metal interaction, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **529**, 012005
- [18] - Ly, H.-B., Monteiro, E., Le, T.-T., Le, V.M., Dal, M., Regnier, G., Pham, B.T., Prediction and Sensitivity Analysis of Bubble Dissolution Time in 3D Selective Laser Sintering Using Ensemble Decision Trees, *Materials* (2019), *12*, 1544.
- [19] - Elise Ferreira, Morgan Dal, Christophe Colin, Guillaume Marion, Cyril Gorny, Damien Courapied, Jason Guy, Patrice Peyre, Experimental and numerical analysis of gas/powder flow for different LMD nozzles, *Metals* (2020), 794332.

### Communications

Congrès internationaux à comités de lecture et actes publiés :

1. M. Dal, L. Carvalho, A. Semerok, W. Pacquentin, H. Maskrot, *Simulation of bi-material nano-second laser ablation*, Paper Number #268, COMSOL CONFERENCE 2019, Cambridge, October 24-26.
2. K. AYFI, M. Dal, F. Coste, N. Gallienne, M. Ridlova, P. Lorong, *Thermomechanical Simulation of Equipment Subjected to an Oxygen Pressure and Heated Locally by the Ignition of Small Particles*, Paper Number #312, COMSOL CONFERENCE 2019, Cambridge, October 24-26.
3. M. Dal, F. Coste, M. Schneider, R. Bolis, R. Fabbro, *Laser Based Method for Surface Tension and Density Measurements for Liquid Refractory Metals (Nb, Ta and W)*, Paper Number #102, 37th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'2018), Orlando (USA), October 14-18.
4. E. Ferreira, M. Dal, P. Peyre, C. Colin, G. Marion, D. Courapied, B. Macquaire, *Numerical and experimental investigation of gas jet flows created by diverse coaxial nozzles during Laser Metal Deposition*, Paper Number #801, COMSOL CONFERENCE 2018, Lausanne (Suisse), October 22-24.
5. Y. A. Mayi, M. Dal, P. Peyre, M. Bellet, C. Metton, C. Moriconi, R. Fabbro, *Two-Phase Flow Modelling of Metal Vaporisation under Static Laser Shot using a Double Domain ALE Method – A Feasibility Study*, Paper Number #801, COMSOL CONFERENCE 2018, Lausanne (Suisse), October 22-24.
6. Remy Fabbro, Morgan Dal, Patrice Peyre, Frédéric Coste, Matthieu Schneider, Valerie Gunenthiram, *Analysis and possible estimation of keyhole depths evolution, using laser operating parameters and material properties*, Paper Number #801, 36th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'2017), Atlanta (USA), October 22-26.
7. Morgan Dal, Valérie Gunenthiram, Patrice Peyre, Matthieu Schneider, *A new equivalent approach for additive manufacturing (SLM) numerical simulation*, Paper Number #1303, 35th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'2016), San Diego (USA), October 16-20.
8. Emna Abouda, Ibrahim Demirci, Cyril Gorny, Tahar Nabil Tarfa, Morgan Dal, *Comparative Study of High-chromium Steel (Fe-Cr-Ni-Mo-Mn) Cladding using Continuous and Pulsed Laser*, Paper Number #502, 35th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'2016), San Diego (USA), October 16-20.
9. Lucille Gouton, Morgan Dal, Pascal Aubry, Hicham Maskrot, Nadège Caron, Wilfried Pacquentin, Marc Foucault, Patrice Peyre, Véronique Favier, *Oxide layer formation on a nickel based alloy using laser surface melting, experimental and numerical study of the*