

---

## Travail de Fin d'Etudes : Modélisation thermo-mécanique par éléments finis d'impression 3D d'alliages métalliques

**Auteur** : van den Brule, Pierrick

**Promoteur(s)** : Duchene, Laurent

**Faculté** : Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme** : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

**Année académique** : 2019-2020

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/8931>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



UNIVERSITÉ DE LIÈGE - FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

---

# Modélisation thermo-mécanique par éléments finis d'impression 3D d'alliages métalliques

---

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES RÉALISÉ EN VUE DE  
L'OBTENTION DU GRADE DE MASTER "INGÉNIEUR  
CIVIL DES CONSTRUCTIONS" "PAR VAN DEN  
BRULE PIERRICK"

Auteur :  
VAN DEN BRULE Pierrick  
s144308

Président :  
DENOËL Vincent

Promoteur :  
DUCHÊNE Laurent

Composition du jury  
HABRAKEN Anne-Marie  
DUYSINX Pierre  
TRAN Van-Xuan

Année académique 2019-2020



# Abstract

This master thesis consists in the study of the comparison between 2 finite element softwares : *Lagamine* and *code\_aster* in the context of a additive manufacturing (AM) process called The laser cladding.

The laser cladding is a additive manufacturing process based on the use of a laser as a heat source and capable of printing a wide range of metal alloys. This process is particularly interesting for the repair of damaged parts. Unlike other AM, The laser cladding can be used on an irregular substrate.

This final study consists of the realization of a digital finite element model representing a lase claddingr process for the repair of a HSS ("High-speedsteel") M4 steel part. The modeling will be carried out using 2 distinct finite element codes : *Lagamine* (developed in Uliège) and the *code\_aster* (developed by EDF, open source code). A study to compare the numerical prediction of *Lagamine* with laboratory experiments has already been carried out at the University of Liège. The objective of this work is to extend this study. The numerical models will reconstruct an experiment described in the paper from R.T . Jardin, J. TchoufangT-chuindjang, L. Duchêne, H.-S. Tran, N. Hashemi, R. Carrus, A. Mertens, A.M. Habraken, 2019 [1]

In this work, you will be presented, on the one hand, a state of the art in which various AM using powders such as those used for laser cladding will be briefly introduced ; on the other hand, a more in-depth definition of the laser cladding process will be given. Then, the type of materials used for this experiment will be presented in a few words : high-speed steels, their microstructures, their applications, etc. Finally, the process will be modelled on *Lagamine* and then *code\_aster* .

This modeling process will include modeling of the geometry and mesh, the heat source and other boundary conditions to be applied, the material as well as the corresponding thermal laws and the activation process of the elements in a way that is faithful to the experimental conditions.

This work is a first step towards the development of a complete thermo-mechanical model.



# Résumé

Ce travail de fin d'études consiste en l'étude de la comparaison entre deux logiciels éléments finis : *Lagamine* et *code\_aster* dans le cadre d'un processus de fabrication additive (FA) appelé Le laser cladding.

Le laser cladding est un processus d'impression basé sur l'utilisation d'un laser comme source de chaleur. Contrairement à d'autres FA qui se font sur lit de poudre, Le laser cladding est basé sur le mouvement de la source de chaleur dans laquelle on projette la poudre. Ce procédé est capable d'imprimer une gamme importante d'alliages métalliques. Ce dernier se veut notamment très intéressant pour la réparation des pièces endommagées. En effet, contrairement aux autres technologies d'impression, Le laser cladding peut être utilisé sur un substrat irrégulier.

Ce travail de fin d'études consiste en la réalisation d'un modèle élément fini numérique représentant un procédé de laser cladding pour la réparation d'une pièce en acier HSS ("High-speed steel") M4. La modélisation sera réalisée via 2 codes éléments finis distincts : *Lagamine* (développé à Uliège) et le *code\_aster* (développé par EDF, code Open source). Une étude destinée à comparer la production numérique de *Lagamine* par rapport à des expériences faites en laboratoire a déjà été réalisée à l'Université de Liège. Le modèle *Lagamine* a été calibré sur cette expérience. L'objectif de ce travail est de reproduire cette étude sur *code\_aster*. Les modèles numériques reconstitueront une expérience décrite dans l'article de R.T. Jardin, J. Tchoufang Tchuindjang, L. Duchêne, H.-S. Tran, N. Hashemi, R. Carrus, A. Mertens, A.M. Habraken, 2019 [1]

Dans ce travail, il vous sera présenté, d'une part, un état de l'art dans lequel il sera introduit brièvement diverses FA utilisant des poudres comme c'est le cas pour Le laser cladding, d'autre part, une définition plus approfondie du procédé de laser cladding. Ensuite, il sera présenté en quelques mots le type de matériaux utilisés pour cette expérience : les aciers rapides, leurs microstructures, leurs applications, etc. Enfin, la modélisation sur *Lagamine* puis *code\_aster* de ce procédé sera effectuée.

Ce procédé de modélisation comprendra une modélisation de la géométrie et du maillage, de la source de chaleur et des autres conditions limites à appliquer, du matériau ainsi que des lois thermiques correspondantes, du procédé d'activation des éléments, et ce, de manière fidèle aux conditions expérimentales.

Ce travail constitue un premier pas vers le développement d'un modèle thermo-mécanique complet.



# Remerciements

Au terme de ce travail de fin d'études, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué à l'élaboration.

Tout d'abord, je remercie particulièrement mon promoteur Laurent Duchêne pour son temps, son aide ainsi que ses précieux conseils.

Ensuite, je souhaite remercier Dr. Van-Xuan Tran qui a apporté de nombreuses suggestions et a largement contribué au bon avancement de ce travail.

J'aimerais également remercier Monsieur Son Hoang disponible à n'importe quelle heure du jour et de la nuit pour répondre à des questions.

Enfin, je désire également remercier toutes autres personnes ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail notamment Messieurs Christophe Geuzaine et Luc Papeleux ainsi que les personnes qui ont relu ce travail à commencer par ma maman, Marie-Christine Renard, mais aussi Maryline Hasé, Jody Erkenne, Yves Renard et enfin ma copine pour son soutien.



## Auteur

Monsieur P. van den Brule  
Étudiant en Master en ingénierie des constructions  
Université de Liège, Belgique  
Pierrick.vandenBrule@student.uliege.be

## Membres du jury

Monsieur V. Denoël, président  
Département ArGEnCo / Analyse sous actions aléatoires en génie civil  
Urban and Environmental Engineering  
Université de Liège, Belgique  
V.Denoel@uliege.be

Monsieur L. Duchêne, promoteur  
Département ArGEnCo / Analyse multi-échelles dans le domaine des matériaux et structures  
du génie civil  
Urban and Environmental Engineering  
Université de Liège, Belgique  
L.Duchene@uliege.be

Madame A-M. Habraken, membre  
Département ArGEnCo  
Faculté des Sciences appliquées / Vice-Doyen à la recherche (Sciences appliquées)  
Urban and Environmental Engineering  
Université de Liège, Belgique  
Anne.Habraken@uliege.be

Monsieur P. Duysinx, membre  
Département d'aérospatiale et mécanique / Ingénierie des véhicules terrestres  
Aérospatiale et Mécanique (A&M)  
Université de Liège, Belgique  
P.Duysinx@uliege.be

Monsieur Van-Xuan TRAN, membre  
Programme Director for "Modelling and Simulation in the Digital Age"  
Institute for Strategic Development  
University of Thu Dau Mot, Vietnam  
xuantv@tdmu.edu.vn



# Nomenclature

## Abréviations

AM : Additive Manufacturing  
DED : Directed Energy Deposition  
FA : Fabrication additive  
SLM : Selective Laser Melting  
EBM : Electron Beam Melting  
SLS : Selective Laser Sintering  
LC : Le laser cladding  
PA : les polyamides  
PS : les polystyrènes  
TPE : les élastomères thermoplastiques  
PAEK : les polyaryléthercétone  
PC : les polycarbonates  
AR : Acier rapide  
ZF : Zone fondue  
ZAT : Zone Affectée Thermiquement  
ZR : Zone Revenue  
CC : cubique centrée  
CFC : cubique à face centrée

## Symboles mathématiques

$\lambda$  : conductivité thermique  
 $c_p$  : capacité thermique massique  
 $h$  : coefficient de convection thermique  
 $\epsilon$  : l'émissivité  
 $\beta$  : l'enthalpie  
 $\sigma$  : constance de Boltzman  
 $\beta$  : facteur d'absorption  
I : intensité  
U : vitesse du laser

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>Contexte</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>Fabrication additive</b>	<b>22</b>
3.1	Différents procédés par fusion de poudre étudiés . . . . .	23
3.2	SLM : la fusion sélective par laser (Selective Laser Melting) . . . . .	25
3.2.1	Procédé . . . . .	25
3.2.2	Avantages et inconvénients . . . . .	26
3.2.3	Matériaux . . . . .	26
3.2.4	Applications . . . . .	27
3.3	EBM : la fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting) . . . . .	28
3.3.1	Procédé . . . . .	28
3.3.2	Avantages et inconvénients . . . . .	29
3.3.3	Matériaux . . . . .	30
3.3.4	Applications . . . . .	30
3.4	SLS : Selective Laser Sintering . . . . .	31
3.4.1	Procédé . . . . .	31
3.4.2	Avantages et inconvénients . . . . .	32
3.4.3	Matériaux . . . . .	33
3.4.4	Applications . . . . .	33
3.5	Conclusion . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Le laser cladding</b>	<b>35</b>
4.1	Procédé . . . . .	36
4.2	Paramètres . . . . .	38
4.3	Avantages et inconvénients . . . . .	38
4.4	Matériaux . . . . .	40
4.5	Applications . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Matériau HSS M4</b>	<b>42</b>
5.1	Composition chimique . . . . .	42
5.2	Comment fabrique-t-on les HSS ? . . . . .	43
5.3	Paramètres . . . . .	43
5.4	Revêtements . . . . .	44
5.5	Applications . . . . .	44
5.6	Microstructure . . . . .	45

5.7	Recherches . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Modélisation Thermique</b>	<b>50</b>
6.1	Problème à modéliser . . . . .	50
6.2	Physique du problème . . . . .	51
6.2.1	Conduction . . . . .	51
6.2.2	Conditions limites . . . . .	52
6.2.3	Convection $h$ et rayonnement $\epsilon$ . . . . .	53
6.3	Modélisation . . . . .	56
6.3.1	Cas particulier du laser cladding . . . . .	56
6.4	Logiciels utilisés . . . . .	57
6.4.1	<i>Lagamine</i> . . . . .	57
6.4.2	GID . . . . .	58
6.4.3	<i>code_aster</i> . . . . .	58
6.4.4	Gmsh . . . . .	59
6.4.5	SALOME_MECA . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Première comparaison des 2 logiciels</b>	<b>61</b>
7.1	Données de l'exercice . . . . .	61
7.2	Analyse des résultats . . . . .	63
7.3	Résultats finaux . . . . .	65
7.4	Comparaison des interfaces . . . . .	65
<b>8</b>	<b>Laser cladding sur <i>Lagamine</i></b>	<b>68</b>
8.1	Laser cladding . . . . .	68
8.2	Liens Thermique - Métallurgique - Mécanique . . . . .	69
8.3	Géométrie du problème 3D . . . . .	70
8.4	Le substrat $42CrMo4$ . . . . .	70
8.5	Représentation 2D . . . . .	71
8.6	Maillage . . . . .	72
8.6.1	La zone de clad . . . . .	72
8.6.2	La zone du substrat . . . . .	73
8.6.3	La zone de support . . . . .	73
8.6.4	Maillage final . . . . .	74
8.6.5	Consistance du maillage . . . . .	75
8.7	Données et principales hypothèses . . . . .	76
8.8	Types d'éléments . . . . .	77
8.8.1	Les éléments CONRA . . . . .	77
8.8.2	Les éléments BLZ2T . . . . .	78
8.9	Lois de comportement . . . . .	79
8.9.1	La loi RACO . . . . .	79
8.9.2	La loi THNL-S . . . . .	80
8.9.3	La loi ELATH . . . . .	83
8.10	Conclusion sur les types de lois utilisés . . . . .	84
8.11	Stratégie de chargement . . . . .	85
8.12	Modélisation de la source de chaleur . . . . .	87
8.13	Résultats fournis par le solveur <i>Lagamine</i> . . . . .	89

<b>9</b>	<b>Laser cladding sur <i>code_aster</i></b>	<b>94</b>
9.1	Fonctionnement du <i>code_aster</i> . . . . .	95
9.1.1	Le fichier de maillage . . . . .	95
9.1.2	Le fichier de commandes . . . . .	95
9.1.3	Architecture du code à fournir . . . . .	96
9.2	Maillage et lois comportementales . . . . .	97
9.3	Conditions limites . . . . .	97
9.4	Source de chaleur . . . . .	98
9.5	Gestion de l'ajout de matière [2] . . . . .	98
9.6	Méthode de résolution envisagée . . . . .	103
9.6.1	Méthode 1 . . . . .	103
9.7	Méthode de l'opérateur <i>THER_NON_LINE_MO</i> . . . . .	104
9.8	Méthode 2 . . . . .	104
9.9	Méthode élément par élément . . . . .	108
9.10	Perspectives . . . . .	109
<b>10</b>	<b>Comparaison</b>	<b>111</b>
10.1	Comparaison des résultats . . . . .	111
10.1.1	Comparaison de l'évolution de la température en fonction du temps d'un point situé proche de la zone du cladding . . . . .	111
10.1.2	Comparaison de la taille de la zone de fusion . . . . .	113
10.1.3	Comparaison de l'évolution du champ de température . . . . .	114
10.2	Comparaison de l'utilisation . . . . .	117
<b>11</b>	<b>Conclusion</b>	<b>120</b>
	Références . . . . .	121

# Table des figures

2.1	Intérêts des modèles numériques [3] . . . . .	21
3.1	Les différents procédés de fabrication additive . . . . .	23
3.2	Représentation d'une imprimante SLM [4] . . . . .	25
3.3	Représentation d'une imprimante SLM par J.Hart [5] . . . . .	26
3.4	Représentation d'une imprimante EBM reprise de [6] . . . . .	29
3.5	Représentation du procédé de SLS [7] . . . . .	32
4.1	Échantillon poudre de $Ni_{85}Al_{15}$ [8] . . . . .	35
4.2	Vue schématique des équipements avec le principe de rechargement [8] . . . .	36
4.3	Les différentes méthodes d'approvisionnement du système [9] . . . . .	37
4.4	Illustration 3D du procédé de laser cladding [10] . . . . .	41
5.1	Organigramme illustratif du procédé de préparation des HSS [11], [12], [13], [14]	43
5.2	Structure CC et CFC [15] . . . . .	45
5.3	Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé (Alliage Fe-0.15%C) [16] . . . . .	47
5.4	a) MC en étoile et carbures intercellulaires M2C eutectiques lamellaires; b) MC intracellulaire en forme de corail, M2C eutectique intercellulaire et cellules raffinées en raison de la fusion multiple; c) MC angulaire grossier et M2C eutectique dans les zones intercellulaires. [1] . . . . .	49
6.1	Première illustration de l'activation et désactivation des éléments [17] . . . . .	50
6.2	Illustration du procédé d'activation des éléments avec les conditions limites[17]	52
6.3	Organigramme de l'utilisation du programme Lagamine . . . . .	57
7.1	Géométrie du problème . . . . .	61
7.2	Loi de comportement de l'acier étudié . . . . .	62
7.3	Représentation du chargement cyclique . . . . .	62
7.4	Graphique de la déformation de la pièce $\epsilon_{yy}$ de métal en fonction du temps .	63
7.5	Graphique de l'évolution de la contrainte dans la plaque . . . . .	63
7.6	Comparaison résolution par <i>Lagamine</i> et <i>code_aster</i> . . . . .	64
7.7	Résolution finale de l'exercice introductif . . . . .	65
7.8	Interface <i>Lagamine</i> lors du calcul . . . . .	66
7.9	Interface SALOME_MECA lors du calcul . . . . .	67
8.1	Interaction thermique, mécanique et métallurgique . . . . .	69
8.2	Géométrie de notre problème . . . . .	70
8.3	Représentation 2D du problème [18] . . . . .	71

TABLE DES FIGURES

8.4	Zone de clad . . . . .	72
8.5	Zone du substrat . . . . .	73
8.6	Zone de support . . . . .	73
8.7	Représentation des noeuds . . . . .	74
8.8	Représentation des éléments . . . . .	74
8.9	Maillage consistant . . . . .	75
8.10	Maillage inconsistant . . . . .	75
8.11	Les trois types d'éléments CONRA . . . . .	77
8.12	Eléments CONRA du maillage [17] . . . . .	78
8.13	Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température T (loi 3,4 et 5) . . . . .	80
8.14	Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température (loi 2) . . . . .	81
8.15	Evolution de la capacité thermique par unité de volume en fonction de la température . . . . .	82
8.16	Aluminium lois 8 et 2 . . . . .	84
8.17	Acier lois 9 et 3 . . . . .	84
8.18	Substrat lois 11 et 5 . . . . .	84
8.19	Clad lois 10 et 4 . . . . .	84
8.20	Illustration du procédé d'activation des éléments [19] . . . . .	85
8.21	Illustration du procédé de discrétisation de la puissance laser . . . . .	87
8.22	Temps t=6.61s fin de la première couche . . . . .	89
8.23	Temps t=7.34s début de la deuxième couche . . . . .	89
8.24	Temps t=98.08s phase intermédiaire . . . . .	89
8.25	Temps t=246.46s fin de l'analyse . . . . .	89
8.26	Localisation des points où nous affichons l'évolution de la température . . . . .	90
8.27	Évolution de la température au niveau du point de référence A (substrat) . . . . .	90
8.28	Evolution de la température au niveau du point de référence B (Acier) . . . . .	91
8.29	Evolution de la température au niveau du point de référence C (Aluminium) . . . . .	91
8.30	Axe de symétrie et point de référence . . . . .	92
8.31	Evolution de la température sur l'axe de symétrie de la pièce . . . . .	92
8.32	Axe horizontal et points de références . . . . .	93
8.33	Evolution de la température sur l'axe horizontal . . . . .	93
9.1	Illustration de l'architecture d'un fichier de commande . . . . .	96
9.2	Illustration visuelle du procédé de soudage réalité vs modélisation [2] . . . . .	99
9.3	Exemple de loi utilisée pour la phase 1 . . . . .	100
9.4	Représentation de la deuxième méthode d'ajout de matière . . . . .	102
9.5	Temps t=2.28s . . . . .	103
9.6	Temps t=4.8s . . . . .	103
9.7	Temps t=7.58s . . . . .	103
9.8	Temps t=11.66s . . . . .	103
9.9	Eléments définis pour la passe 1 . . . . .	105
9.10	Zoom sur le clad . . . . .	105
9.11	Zoom sur le clad du deuxième modèle . . . . .	105
9.12	Organigramme de la méthode utilisée . . . . .	106
9.13	Première couche, premiers éléments temps t = 0 sec. . . . .	107
9.14	Milieu de la première couche temps t = 4,4 s. . . . .	107

TABLE DES FIGURES

9.15 Derniers éléments de la première couche temps $t = 6,86$ s. . . . .	107
9.16 Premiers éléments de la deuxième couche temps $t = 7,26$ s. . . . .	107
9.17 Milieu de deuxième couche temps $t = 9,26$ s. . . . .	107
9.18 Fin de la deuxième couche temps $t = 13,22$ s. . . . .	107
9.19 Zoom passe 1 avec une seule couche de clad . . . . .	107
9.20 Zoom passe 2 avec deux couches de clad . . . . .	107
9.21 Résultats <i>code_aster</i> méthode élément par élément . . . . .	108
9.22 Interaction thermique, mécanique et métallurgique . . . . .	109
10.1 Point de référence . . . . .	112
10.2 Évolution température [K] en fonction du temps [s] pour <i>Lagamine</i> . . . . .	112
10.3 Évolution température [K] en fonction du temps [s] pour le <i>code_aster</i> méthode couche par couche . . . . .	113
10.4 Évolution température [K] en fonction du temps [s] pour le <i>code_aster</i> méthode élément par élément . . . . .	113
10.5 Zone de fusion <i>Lagamine</i> . . . . .	114
10.6 Zone de fusion <i>code_aster</i> méthode couche par couche . . . . .	114
10.7 Zone de fusion <i>code_aster</i> méthode élément par élément . . . . .	114
10.8 Champ de température <i>Lagamine</i> . . . . .	115
10.9 Champ de température <i>code_aster</i> méthode couche par couche . . . . .	115
10.10 Champ de température <i>code_aster</i> méthode élément par élément . . . . .	116
10.11 Illustration de la méthodologie des fichiers input . . . . .	117

# Liste des tableaux

5.1	Composition chimique du HSS M4 utilisé . . . . .	42
7.1	Données de la loi de comportement . . . . .	62
8.1	Données de la loi RACO . . . . .	79
8.2	Données de la loi EALTH . . . . .	83
8.3	Lois comportementales couplées . . . . .	83

# Chapitre 1

## Introduction

Le laser cladding est un procédé de fabrication additif basé sur l'utilisation d'un rayon laser comme source de chaleur. Le laser cladding est capable de traiter une grande variété d'alliages. Son application principale est la réparation ou le revêtement de pièces.

Cependant, cette technologie n'est pas toujours bien maîtrisée. Le procédé nécessite un calibrage très précis sans quoi le rendu de l'impression peut ne pas être net et peut même être fissuré. Une solution pour résoudre ces problèmes est le développement d'un modèle numérique pour la simulation de processus.

Le procédé étudié dans le cadre de ce travail est un procédé de laser cladding d'une pièce en acier rapide (HSS) avec un substrat en  $42CrMo4$  et une base en aluminium. Concrètement, les modèles numériques conçus reproduisent une des expériences décrites dans l'article soumis par R.T. Jardin, J. Tchoufang Tchouindjang, L. Duchêne, H.-S. Tran, N. Hashemi, R. Carrus, A. Mertens, A.M. Habraken intitulé *Thermal histories and microstructures in Direct Energy Deposition of a High Speed Steel thick deposit*. [1]

Dans ce travail, il vous sera présenté, d'une part, un état de l'art dans lequel il sera introduit brièvement diverses méthodes de fabrication additive (FA) utilisant des poudres comme c'est le cas pour Le laser cladding ; d'autre part, une définition plus approfondie du procédé de laser cladding. Ensuite, il sera présenté en quelques mots le type de matériaux utilisés pour cette expérience : les aciers rapides, leurs microstructures, leurs applications, etc. Enfin, la modélisation sur *Lagamine* puis *code\_aster* de ce procédé sera effectuée.

Ce procédé de modélisation comprendra une modélisation :

- de la géométrie et du maillage qu’il a fallu importer dans GMSH ;
- de la source de chaleur et des autres conditions limites à appliquer ;
- du matériau ainsi que des lois thermiques et mécaniques correspondantes ;
- du procédé d’activation des éléments.

Et ce, de manière fidèle aux conditions expérimentales.

Ensuite, nous analyserons les profils de température dans l’espace et dans le temps. Il s’en suivra une comparaison des solutions des deux logiciels et une validation des résultats par les données récoltées lors de l’expérience [1].

Ce travail de fin d’études a donc pour but d’analyser la corrélation qu’il y a entre différentes modélisations numériques d’une part et avec des données expérimentales d’autre part. Les modèles trouvés permettront alors de mieux maîtriser le principe de laser cladding.

# Chapitre 2

## Contexte

Les méthodes Direct Energy Deposition (DED) sont des procédés de plus en plus utilisés pour réparer des composants de grandes valeurs qui se sont altérés au cours de leur vie. Souvent, le processus de réparation requis est unique, précis et coûteux. C'est pourquoi les techniques de modélisation sont nécessaires pour minimiser les risques du processus de réparation. Le procédé DED soumet le composant à des gradients thermiques élevés, ce qui entraîne des contraintes résiduelles de grandes amplitudes. La prédiction de ces paramètres réduirait la nécessité d'essais expérimentaux coûteux pour quantifier la stratégie de réparation [20][21].

L'évolution des procédés de soudage appliqués aux aciers a permis d'atteindre aujourd'hui une bonne reproductibilité des opérations. Les risques d'endommagement de pièces soudées sont multiples : par fatigue, par fluage, par corrosion, par rupture fragile... C'est pourquoi il est important de se doter d'outils robustes et fiables pour simuler ce procédé.

Comme dit dans [22] : *"Les imprimantes 3D métal sont les fonderies du XXI siècle"*. C'est pour cette raison qu'il existe énormément de recherches à ce sujet.

Les modèles numériques ont une importance capitale dans notre société. En introduisant des outils de vérification de la conception assistée par ordinateur dès le début de la conception du produit, le temps et les coûts perdus dans le cycle "prototype - test - reconception" sont considérablement réduits. La figure 2.1 illustre le gain des entreprises qui utilisent des modèles numériques.

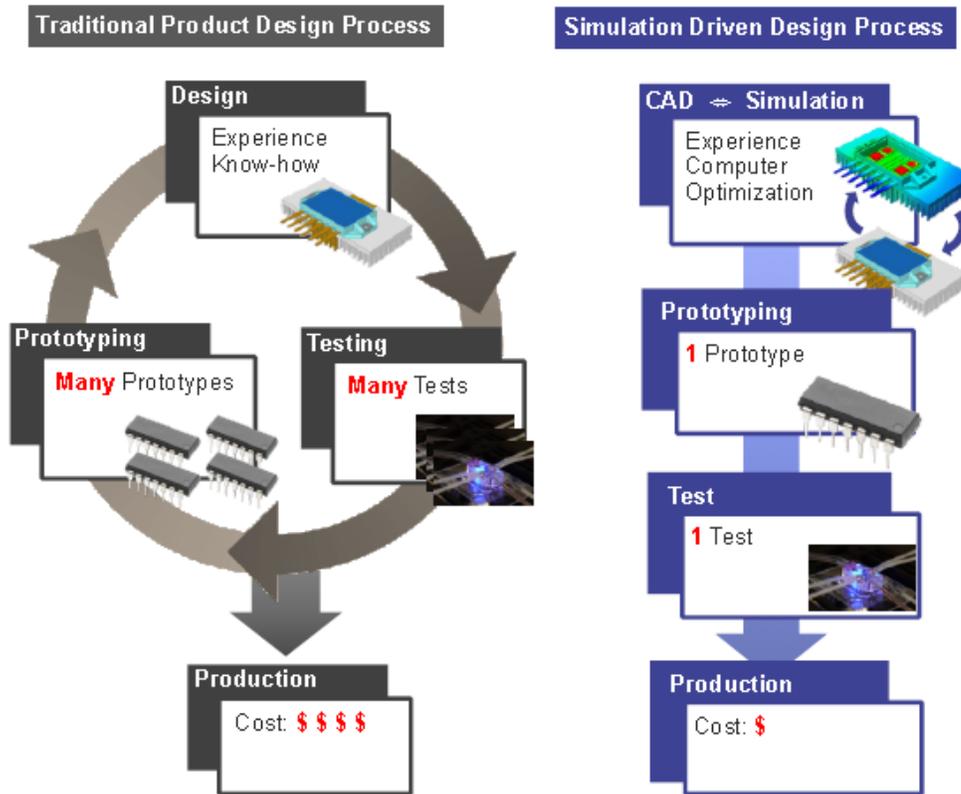


FIGURE 2.1 – Intérêts des modèles numériques [3]

En investissant dans les méthodes numériques, les entreprises obtiennent des résultats plus rapidement et de manière moins coûteuse. Elles peuvent alors concentrer leurs principaux efforts sur l'innovation des produits et être les plus concurrentielles.

# Chapitre 3

## Fabrication additive

L'impression 3D ou fabrication additive<sup>1</sup> regroupe les procédés de fabrication de pièces en volume par ajout ou agglomération de matière et par empilement de couches successives. Ces méthodes sont plutôt novatrices. On observe les premières impressions 3D au début des années 2000. L'impression 3D permet de réaliser un objet réel à partir de poudre. Le principe reste proche de celui d'une imprimante 2D classique à cette grande différence près : c'est l'empilement des couches qui crée le volume.

Le processus de mise en forme par fabrication additive est, en théorie, assez simple. On a besoin : d'un matériau, d'une source d'énergie et d'un modèle CAO<sup>2</sup>. Le modèle CAO est un logiciel qui permet aux dessinateurs de réaliser la pièce, la réparation ainsi que l'impression demandée. La matière de base se présente sous forme de liquide, de poudre, de ruban ou de fil. La mise en forme de la matière première se fait par le biais de la source de chaleur qui peut être un laser, un faisceau d'électrons, une lumière visible, des rayons UV ou IR ou grâce à une source de chaleur.

Dans ce chapitre, nous présenterons les procédés de fabrication additive. L'accent sera mis sur les procédés destinés à l'impression des alliages métalliques, alors que ceux-ci ne représentent qu'une fraction des fabrications additives. La figure 3.1 répertorie la plupart des fabrications additives. Dans le cadre de ce travail, c'est la partie fusion de poudre qui nous intéresse.

Le processus peut être soit physique : une fusion suivie par solidification ou procédé de frittage sur lit de poudre, soit chimique : par photopolymérisation. On distingue quatre grandes familles d'impression 3D par photopolymérisation : SLA : StéréolithographieApparatus, DLP : Traitement numérique de la lumière et Daylight Polymer Printing (DPP) par Photocentric. Même si ce ne sont pas ces processus qui nous intéressent, il me paraissait cependant opportun des les citer.

On distingue deux grandes familles de fusion de poudre :

- fabrication sur lit de poudre ;
- fabrication par projection.

---

1. Additive manufacturing en anglais.  
2. Conception Assistée par Ordinateur.

Le laser cladding fait partie de cette seconde catégorie comme l'illustre la figure 3.1.

Les fabrications sur lit de poudre reprennent différents procédés très couramment utilisés tels que :

- la fusion sélective par laser ;
- la fusion par faisceau d'électrons ;
- le frittage laser sélectif.

Différents processus sont définis et expliqués plus en détails dans la suite de ce chapitre<sup>3</sup>. Le procédé de laser cladding au chapitre 4.

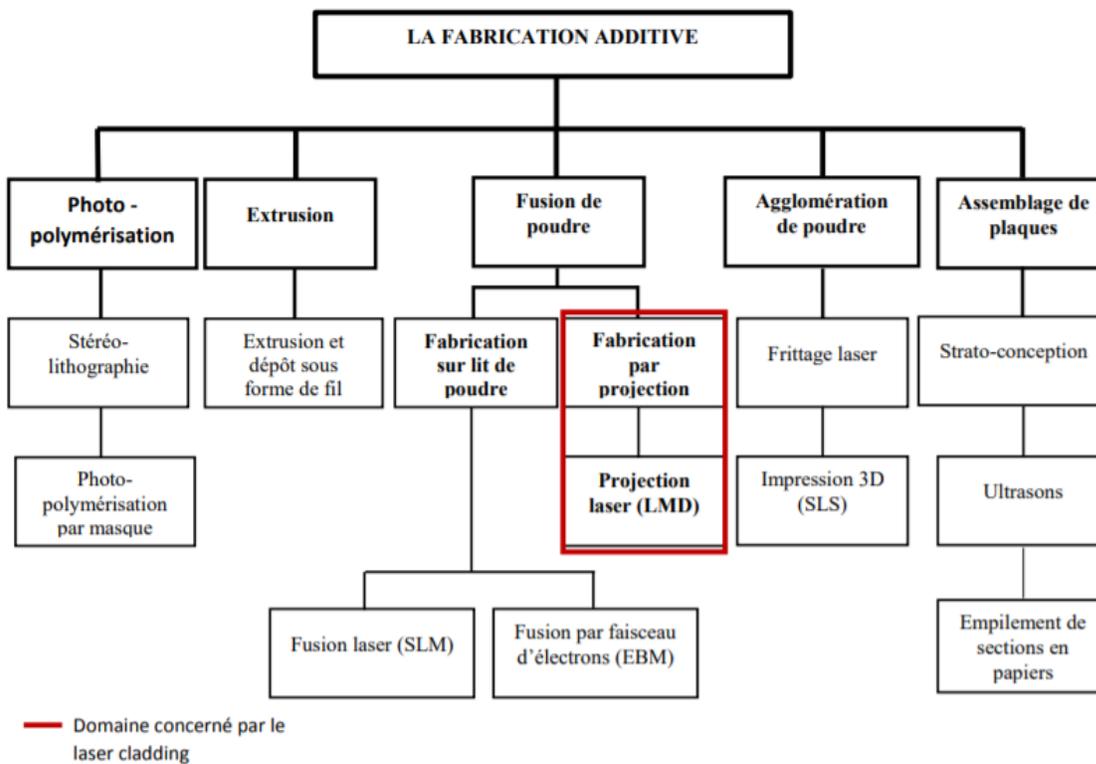


FIGURE 3.1 – Les différents procédés de fabrication additive

### 3.1 Différents procédés par fusion de poudre étudiés

Les procédés étudiés sont :

- SLM : la fusion sélective par laser (Selective Laser Melting) ;
- EBM : la fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting) ;
- SLS : le frittage sélectif par laser (Selective Laser Sintering) ;
- LC : Le laser cladding.

3. sections 3.2.1, 3.3.1, 3.4.1.

Chacun de ces procédés de la partie fusion sur lit de poudre sera défini, présenté, expliqué et des exemples d'applications industrielles seront fournis. Les impressions 3D par photopolymérisation comme expliqué précédemment ne seront pas plus détaillées. Il était toutefois nécessaire de les aborder car elles composent aussi une partie importante des impressions 3D.[23]

Le procédé de laser cladding étant au cœur de ce mémoire, ce procédé sera détaillé en profondeur dans le chapitre 4.

Les applications de l'impression 3D sont multiples. Peu à peu, elles gagnent des secteurs industriels qui vont de la production de pièces de voitures, d'avions, de bâtiments, d'armes à des applications pour la médecine, etc. Certaines applications sont propres à un procédé et donc les applications par procédé seront détaillées aux sections 3.2.4, 3.3.4, 3.4.4 et 4.5.

## 3.2 SLM : la fusion sélective par laser (Selective Laser Melting)

La fusion sélective par laser (Selective Laser Melting en anglais) est une technique de fabrication additive capable de produire des pièces métalliques à l'aide de lasers de haute puissance, faisant fusionner progressivement et localement, c'est-à-dire de façon sélective, une poudre métallique dans une atmosphère contrôlée. [7]

La fusion sélective par laser SLM se distingue des autres procédés d'impression 3D par la fonte complète de la poudre. La poudre est liquéfiée assez longtemps ce qui permet alors d'obtenir une pièce homogène. On a donc un meilleur contrôle de la structure cristalline ainsi qu'une porosité réduite ce qui donne des pièces moins sujettes à des défaillances.

### 3.2.1 Procédé

Avec la fusion sélective au laser, de fines couches de poudre métallique sont réparties uniformément sur une plaque de substrat, généralement métallique, qui est fixée à une table d'indexation qui se déplace dans l'axe vertical. Cette opération a lieu à l'intérieur d'une chambre contenant une atmosphère étroitement contrôlée de gaz inerte. Une fois que chaque couche a été répartie, chaque tranche 2D de la géométrie de la pièce est fondue par le passage du laser. Ceci est réalisé avec un faisceau laser de haute puissance, généralement un laser à fibre d'ytterbium. Le faisceau laser est dirigé dans les directions du plan horizontal à l'aide de deux miroirs de balayage à haute fréquence. L'énergie laser est suffisamment intense pour permettre la fusion complète (soudage) des particules puis devenir un métal solide en refroidissant. Le processus est répété couche après couche jusqu'à ce que la pièce soit complète. La machine est illustrée à la figure 3.2 [4] .

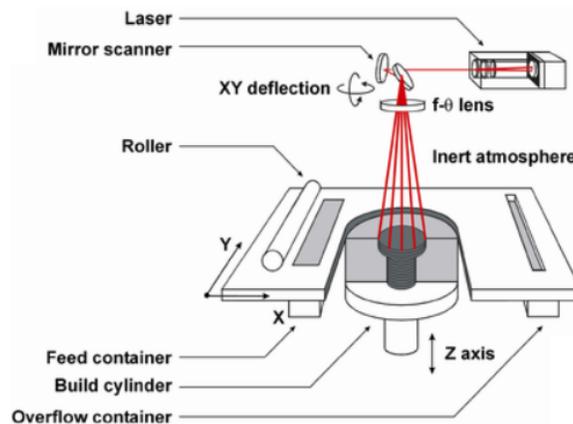


FIGURE 3.2 – Représentation d'une imprimante SLM [4]

Le procédé de construction couche après couche est décrit de manière plus visuelle par J.Hart [5] sur la figure 3.3.

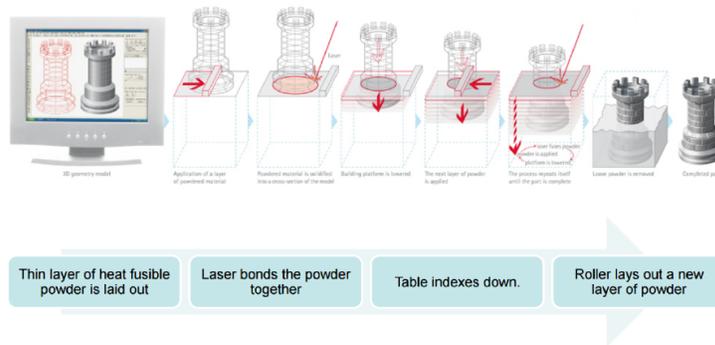


FIGURE 3.3 – Représentation d’une imprimante SLM par J.Hart [5]

### 3.2.2 Avantages et inconvénients

La SLM présente de nombreux avantages par rapport aux techniques de fabrications traditionnelles. La capacité de production rapide des pièces uniques à géométries complexes est la plus importante car aucun outillage spécial n’est nécessaire et les pièces peuvent être fabriquées en peu de temps, de l’ordre de quelques heures. Comme les composants sont construits couche par couche, il est possible de concevoir des géométries organiques, des caractéristiques internes et des passages difficiles qui ne pourraient pas être moulés ou usinés. En effet, le SLM ne nécessite pas d’outillage spécial comme les pièces moulées, ce qui le rend pratique pour les petites séries de production.

En revanche, les surfaces doivent généralement être polies pour obtenir une finition miroir ou extrêmement lisse. L’enlèvement de la structure de support métallique et le post-traitement de la pièce produite peuvent être un processus long. De plus, ce procédé est assez coûteux, on conseille donc de ne produire que peu de pièces.

Le principal défi de la SLM est la limitation des matériaux transformables. Ce défi peut être relevé en approfondissant les recherches sur la manière dont les matériaux interagissent lorsqu’ils sont fusionnés.

### 3.2.3 Matériaux

Les matériaux qui peuvent être imprimés par SLM sont principalement :

- l’acier ;
- l’aluminium ;
- le titane ;
- le cobalt-chrome ;
- les alliages de nickel.

### 3.2.4 Applications

Les applications où les imprimantes SLM sont utilisées sont variées, on distinguera notamment :

- l'aérospatial [24] : conduits d'air, montages ou supports d'instruments aéronautiques spécifiques ;
- le médical : les dispositifs médicaux sont des produits complexes et de grande valeur. Ils doivent répondre exactement aux exigences des clients. C'est de la fabrication sur mesure. Cela peut engendrer à une multitude de variétés et donc à des variantes. On notera notamment comme application l'utilisation de structures poreuses irrégulières similaires à celles du tissu osseux humain. [25][26], etc. ;
- le prototypage : l'impression au laser peut aider en mettant à disposition des prototypes de conception fonctionnels. Ainsi, les essais peuvent être lancés rapidement et de manière flexible. Dans le même temps, ces prototypes peuvent être utilisés pour évaluer l'acceptation potentielle par les clients ;
- l'outillage : le processus direct élimine la génération de parcours d'outils et les processus d'usinages multiples. Les plaquettes d'outils sont fabriquées en quelques heures seulement. La liberté de conception peut également être utilisée pour optimiser les performances de l'outil. Les outils de coupes sont les plus réalisés par SLM.[27] [28] ;
- etc.

### 3.3 EBM : la fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting)

L'impression 3D de fusion par faisceau d'électrons est la traduction d'Electron Beam Melting. Cette technologie a été mise au point par la société suédoise Arcam [29].

La fusion par faisceau d'électrons est un autre procédé de fabrication additive de fusion sur lit de poudre. La technologie est similaire à la fusion sélective par laser (SLM). La construction se fait également couche par couche. La différence principale réside dans la source d'énergie qui est un canon à électrons et non plus un laser.[30]

#### 3.3.1 Procédé

L'imprimante EBM est représentée schématiquement à la figure 3.4. Cette imprimante ressemble à un microscope électronique à balayage, où un canon à électrons (1) génère un faisceau d'électrons initial. Ce faisceau est accéléré par un système de lentilles de focalisation (2) et est équipé d'un système de bobines de balayage magnétique (3).

Le faisceau d'électrons focalisé est balayé sur la couche de poudre dirigée par un modèle CAO intégré. La couche de poudre est formée en ratissant la poudre qui arrive en (5) sur la figure 3.4 par gravité des cassettes (4). Le composant (6) est construit par préchauffage et fusion sélective de chaque couche successive dans la direction de construction, soit vers le haut (indiquée par la flèche en B). La table de construction (7) est abaissée en fonction de l'état d'avancée de la construction de la pièce comme indiqué par la grande flèche de sens opposé à la direction de construction [6].

Cette technique se distingue aussi du frittage sélectif au laser car la matière première fusionne après avoir complètement fondu. De plus, la fusion des particules de poudre se déroule sous vide. [30]

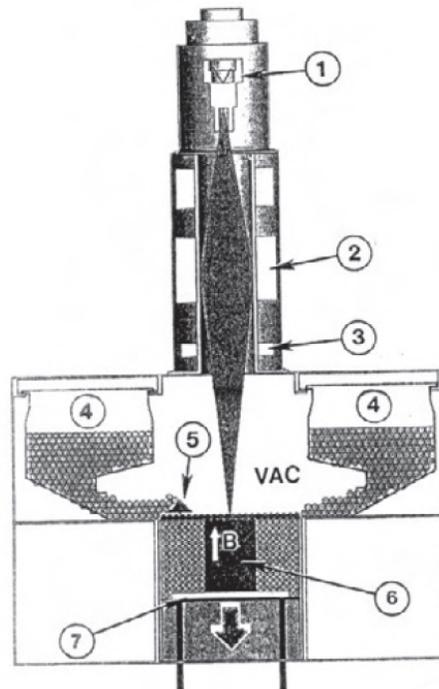


FIGURE 3.4 – Représentation d’une imprimante EBM reprise de [6]

### 3.3.2 Avantages et inconvénients

Cette technologie permet de fondre des matériaux difficiles à fondre avec des méthodes traditionnelles. En effet, le faisceau d’électrons offre une puissance plus concentrée que le faisceau laser. Le faisceau peut aisément atteindre des températures de 1400°C et bien plus encore ce qui conduira à des températures du matériau très importantes.

Néanmoins, en contre-partie la chambre d’impression doit être à une température élevée d’une part et d’autre part, le faisceau d’électrons requiert un vide élevé.

De plus, une étape de préchauffage est nécessaire pour fritter légèrement la couche superficielle du lit pour éviter notamment les projections dues aux phénomènes électrostatiques et ainsi consolider le lit de poudre. Ce préchauffage rend plus complexe l’opération de nettoyage.

La technologie EBM possède d’autres avantages sur les procédés SLM :

- ce procédé d’impression est extrêmement rapide ;
- le métal utilisé n’est pas une version dégradée ;
- le taux de recyclabilité est plus élevé car la poudre non fondue est réutilisable pour une autre impression ;
- deux effets bénéfiques découlent du préchauffage du lit : la couche superficielle de poudre est solidarisée avec les couches inférieures et sa conductivité est améliorée ;
- le préchauffage permet aussi de limiter la quantité de supports nécessaires à la tenue de la pièce dans la cuve.

En revanche, l'utilisation d'un canon à électrons a quelques incidences sur le procédé de fabrication. La première est que l'angle de déviation du faisceau est limité, dû à la forme cylindrique naturelle d'une cuve. Autre bémol dans cette technologie, la granulométrie de la poudre est supérieure à la plupart des autres procédés additifs métalliques car les matériaux utilisés doivent impérativement être conducteurs pour permettre une interaction entre le faisceau d'électrons et la poudre et suffisamment lourds pour ne pas être trop sensibles aux phénomènes électrostatiques. La finition et la précision des objets imprimés se voient donc limitées. On observe souvent un aspect granulaire sur les impressions EBM.

### 3.3.3 Matériaux

Les matériaux qui peuvent être imprimés par EBM sont notamment :

- les alliages de titane<sup>4</sup> ;
- le cuivre ;
- le niobium ;
- l'AL 2024 ;
- le verre métallique massif ;
- l'acier inoxydable ;
- l'aluminide de titanium.

### 3.3.4 Applications

Les applications de la fabrication additive métal sont nombreuses et très semblables à celles des SLM. La technologie EBM offre de grandes opportunités à l'industrie mondiale. Dans le secteur aéronautique [31], [32], elle permet la fabrication de pièces moteur, résistantes et légères, difficilement réalisables avec les méthodes traditionnelles. C'est également le cas dans l'industrie spatiale [33] ou chez les constructeurs automobiles. Le secteur médical utilise l'impression 3D de fusion par faisceau d'électrons pour la production de prototypes d'implants crâniens [34], [35], d'instruments orthopédiques [36] ou encore pour des applications dentaires [37], [38].

---

4. pour les implants médicaux principalement.

## 3.4 SLS : Selective Laser Sintering

Le procédé de frittage sélectif par laser (SLS, Selective Laser Sintering, en anglais) est une technique de prototypage rapide par frittage laser sélectif sans phase liquide. En effet, ici on chauffe jusqu'à un point spécifique où les grains encore solides de poudre fusionnent ensemble.

### 3.4.1 Procédé

Avant de commencer l'étude du procédé SLS, il faut bien comprendre la distinction qu'il y a entre le frittage et la fusion (sintering and melting en anglais). En voici les définitions :

frittage : le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre **sans la mener jusqu'à la fusion**. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion de la pièce. On distingue deux types de frittages : [39] [40]

- le frittage en phase solide : tous les constituants restent en phase solide ;
- le frittage en phase liquide : au moins un des constituants est en phase liquide alors que au moins un reste en phase solide.

fusion : passage d'un corps solide à l'état liquide sous l'action de la chaleur.

En résumé, le frittage est un procédé qui permet une transformation sans changement de phase de la poudre.

Les prototypes SLS sont fabriqués à partir de poudre de matériaux qui sont sélectivement frittés (voir section 3.4.1) par un laser. Le faisceau laser apporte une énergie thermique, relativement faible, pour amener les contacts des grains à la température permettant la diffusion à l'état solide. En réalité, ce frittage présente, presque toujours, une phase liquide très minoraire et située aux joints de grains.

La partie gauche de la figure 3.5 représente l'imprimante SLS. La machine est composée d'une chambre de construction là où se situe l'objet à fabriquer (object being fabricated). Elle repose sur un piston principal (Fabrication piston), entouré à gauche et à droite<sup>5</sup> par deux pistons secondaires (powder delivery piston) fournissant la poudre (powder delivery system). L'imprimante comprend également un laser (Laser) et un rouleau (roller) pour étaler la poudre.

En ce qui concerne le fonctionnement : le piston principal est remonté au maximum tandis que les pistons secondaires sont à leur point le plus bas. Le rouleau étale la poudre en une couche uniforme sur toute la chambre. Le laser trace alors la section 2D sur la surface de la poudre, en la frittant. Le piston de fabrication descend de l'épaisseur d'une strate tandis qu'un des pistons d'approvisionnement en poudre monte (ils alternent). Une nouvelle couche de poudre est étalée sur toute la surface par le rouleau, et le processus se répète jusqu'à ce que la pièce soit terminée.

---

5. NB : Sur ce schéma, on a représenté que le piston de gauche.

Il existe d'autres machines où la poudre n'arrive pas par le bas mais par le haut grâce aux pistons secondaires. Cette méthode permet de gagner du temps car on n'est alors pas obligé d'arrêter la fabrication des pièces pour réapprovisionner la machine en poudre.

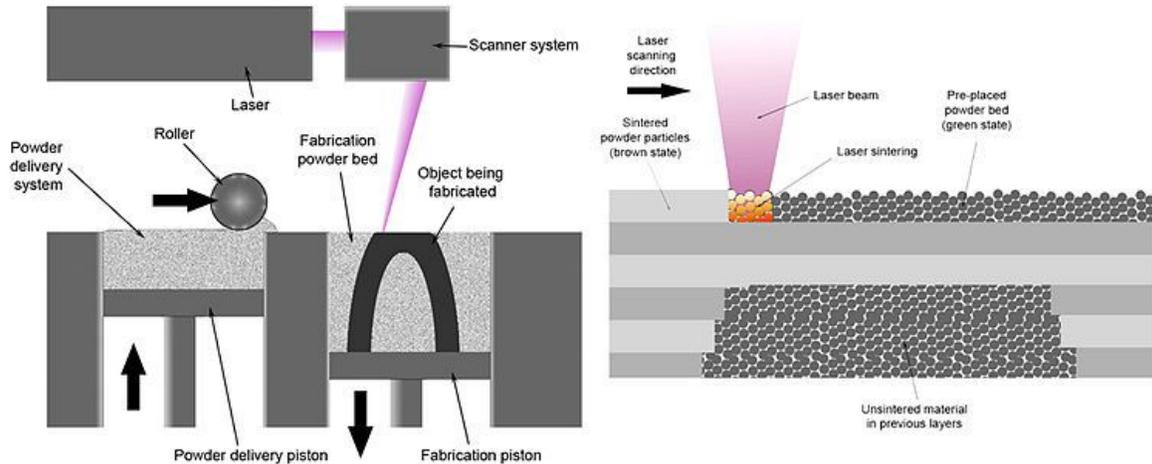


FIGURE 3.5 – Représentation du procédé de SLS [7]

### 3.4.2 Avantages et inconvénients

Les principaux avantages des imprimantes SLS sont :

- on peut réaliser des géométries complexes, avec des composants intérieurs notamment, car le lit de poudre frittée est entièrement autoportant ainsi que par l'enlèvement du support,...
- bonne résistance chimique ;
- diverses possibilités de finition (par exemple : métallisation, émaillage au four, broyage par vibration, coloration de la cuve, collage, poudre, revêtement, flocage, etc.) ;
- processus de fabrication additive le plus rapide pour bons nombres d'applications ;
- ce procédé permet de réaliser des pièces avec une précision extrême, mais avec une porosité importante, car la densification n'a pas eu le temps de s'effectuer ;
- il est possible de réaliser un frittage complémentaire dans un four car le matériau est à l'état préfritté et de nombreuses applications ne demandent pas une densification élevée pour conserver une porosité résiduelle.

En revanche, on dénombre quelques inconvénients :

- le fini n'est pas toujours optimum : on peut observer un fini de surface granuleux dû à la taille des particules de poudre ;
- les machines peuvent prendre du temps à chauffer pour atteindre la température de fabrication et à refroidir ensuite ;
- les pièces peuvent se déformer de façon significative ;
- la pièce doit ensuite être retirée précautionneusement de la machine et nettoyée de la poudre non frittée qui l'entoure comme les SLM et EBM ;

- les domaines de paramétrage sont très étroits<sup>6</sup> et ils oscillent entre des états frittés avec une cohésion satisfaisante et des états non frittés. Ils sont adoptés pour des matériaux monophasés.

### 3.4.3 Matériaux

Les matériaux qui peuvent être imprimés par SLS sont principalement des polymères tels que :

- les polyamides (PA), tel que le nylon ;
- les polystyrènes (PS) ;
- les élastomères thermoplastiques (TPE) ;
- les polyaryléthercétones (PAEK) ;
- les polycarbonates (PC) ;
- PEBA,<sup>7</sup> ;
- les alumides ;
- les carbonmides ;
- les céramiques ;
- du verre.

Les polyamides, tel que le nylon, sont les matériaux SLS les plus souvent utilisés en raison de leur très bon comportement au frittage. En effet, les PA sont des thermoplastiques semi-cristallins, ce qui permet d'obtenir des pièces aux propriétés mécaniques souhaitables.

Le polycarbonate (PC) est un matériau de grand intérêt pour la SLS. Il possède une grande ténacité (ténacité de l'ordre de 675 J/m) une bonne stabilité thermique ainsi qu'une résistance à la flamme élevée ; néanmoins, ces polymères amorphes traités par la SLS ont tendance à donner des pièces aux propriétés mécaniques réduites et à la précision dimensionnelle faible. Les applications sont donc limitées.

### 3.4.4 Applications

La technologie SLS est largement utilisée dans de nombreuses industries à travers le monde en raison de sa capacité à réaliser facilement des géométries complexes avec peu d'efforts de fabrication. Son application la plus courante concerne les pièces prototypes au début du cycle de conception, par exemple pour les modèles de moulage à la cire perdue, le matériel automobile et les modèles de soufflerie. La SLS est également de plus en plus utilisée dans la fabrication en série limitée pour produire des pièces d'utilisation finale pour l'aérospatial, l'armée, la médecine et le matériel électronique. Dans un atelier, la SLS peut être utilisée pour la fabrication rapide d'outillage.

---

6. régularité des grains, longueur d'onde du laser, etc.

7. Polyéther block amide.

## 3.5 Conclusion

Il existe aujourd'hui plusieurs techniques de fabrication additive qui se distinguent par la source (un laser, du plasma ou un faisceau d'électrons...) mais aussi la nature du matériau à fondre et la forme de la pièce à élaborer.

# Chapitre 4

## Le laser cladding

Le laser cladding (LC) appartient à la famille des technologies de dépôt sous énergie concentrée (DED - Directed Energy Deposition) comme illustré sur la figure 3.1. La poudre métallique aussi appelée clad est chauffée grâce au faisceau laser qui soude la matière fondue sur le substrat. Le dépôt se fait par une projection de poudre dans un faisceau laser divergent. La surface du substrat fond et nous obtenons une pièce unique. [41] [9]

Alors que les procédés EBM et SLM sont des procédés en lit de poudre dans lesquels la poudre est fondue localement, le LC fait en sorte que la poudre n'est plus déposée dans un lit de poudre. Celle-ci est projetée sur le laser qui la fait fondre sur le substrat. Elle est fondue et consolidée au moyen du laser afin de recouvrir une partie d'un substrat ou de fabriquer une pièce de forme quasi nette.[41] [9]

La figure 4.1 est une photo venant de [8] d'un procédé de laser cladding sur une poudre de  $Ni_{85}Al_{15}$ .

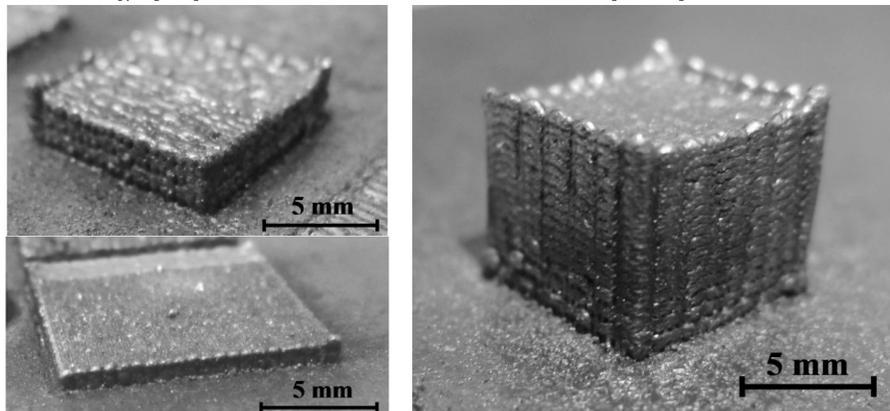


FIGURE 4.1 – Échantillon poudre de  $Ni_{85}Al_{15}$  [8]

## 4.1 Procédé

Les équipements qui composent l'imprimante pour Le laser cladding sont assez différents des autres méthodes de manufactures additives car le procédé n'est pas le même, nous ne sommes plus sur un lit de poudre à fondre. La figure 4.2 les schématise. On distingue toutefois trois éléments clés : la buse, la machine et le logiciel.

Le procédé nécessite une buse permettant un cordon de matière fondue plus fin que les autres AM. Cependant, une qualité de réglages accrue et surtout une maîtrise parfaite des caractéristiques géométriques de ces dépôts est nécessaire au bon fonctionnement. La buse assure l'injection des poudres métalliques dans le but de les fondre avec un rendement élevé en garantissant une couverture gazeuse optimale. Celle-ci permet de réaliser des cordons aux dimensions bien définies allant de 0,8 mm de largeur jusqu'à plus de 4,5 mm. La précision du dépôt est de l'ordre du dixième de millimètre.

L'imprimante nécessite l'utilisation d'une machine aux performances mécaniques élevées pour avoir la précision de déplacement nécessaire aux respects des stratégies de construction. La poudre est souvent transportée à l'aide d'un gaz. Ce système d'alimentation peut être équipé de plusieurs réservoirs offrant la possibilité d'injecter différentes poudres de matériaux différents. C'est une caractéristique rare et précieuse car très peu de FA le permettent.

Enfin, comme pour les autres AM, le logiciel permet de traduire le modèle numérique issu d'un logiciel de CAO en un programme pilotant les déplacements.

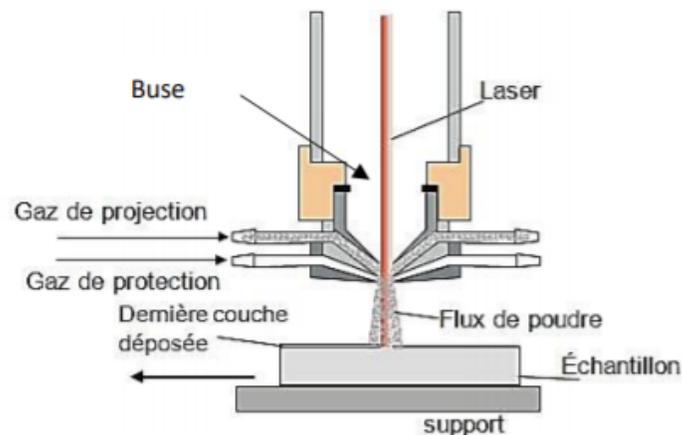


FIGURE 4.2 – Vue schématique des équipements avec le principe de rechargement [8]

La figure 4.2 montre également un schéma d'une passe laser. Alors que le laser frappe la surface, la poudre brute est ajoutée par les extrémités des buses. La température augmente en raison de l'énergie laser. La poudre, transportée par un gaz neutre fond en vol suite à l'interaction avec le laser et se dépose sur la pièce à traiter. L'interaction se fait grâce à la buse. Un bassin de fusion est alors créé à la surface entre le clad et le substrat. Le clad fusionne avec le substrat, créant ainsi une seule piste. Lorsque le laser est passé, le clad en fusion se solidifie en raison du refroidissement. Ce refroidissement est rapide et il dépend des

conditions du milieu ; il refroidit par convection, rayonnement à la surface, et par conduction à l'intérieur de l'objet. Les parties déjà solidifiées reçoivent la chaleur du laser ainsi que la poudre lors du layer suivant, ce qui les refond.

Un gaz inerte est projeté en même temps que la poudre pour éviter l'oxydation. Comme dans la SLM, le LC se fait sous atmosphère contrôlée en utilisant un gaz inerte.

Notons que la nature du processus génère des taux de refroidissement et de chauffage élevés, ce qui provoque de fortes modifications de la microstructure des matériaux.

La poudre utilisée dans Le laser cladding est principalement de nature métallique et est injectée dans le système par des buses coaxiales ou latérales. L'interaction entre le flux de poudre métallique et le laser provoque la fusion. Ce flux est déposé sur un substrat ; le déplacement du substrat permet au melt pool de se solidifier et de produire ainsi une trace de métal solide. C'est la technique la plus courante, mais certains procédés impliquent de déplacer l'ensemble laser/buse sur un substrat fixe pour produire des traces solidifiées. La figure 4.3 représente quatre différentes méthodes d'approvisionnement.[9]

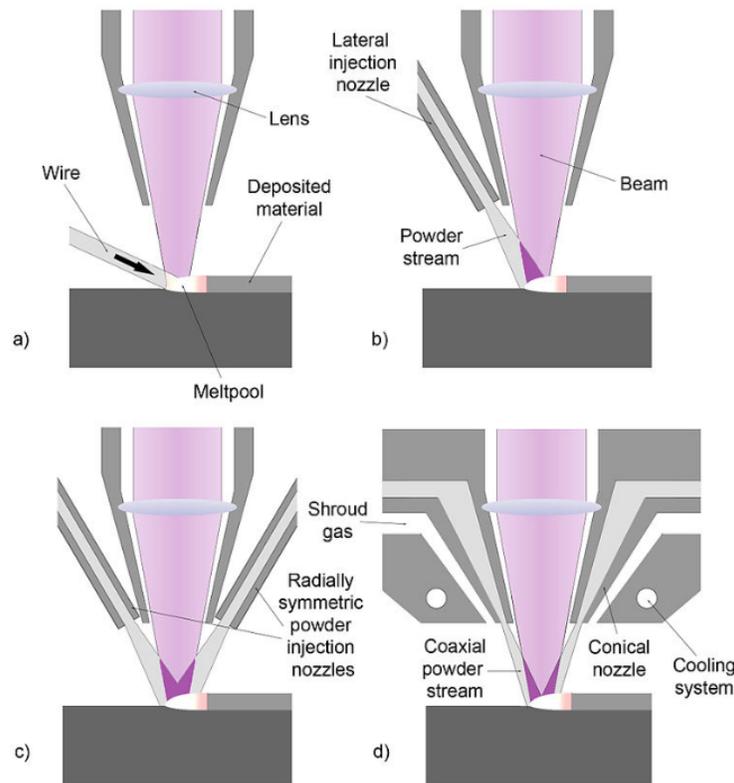


FIGURE 4.3 – Les différentes méthodes d'approvisionnement du système [9]

## 4.2 Paramètres

Lors du processus de laser cladding, les paramètres à prendre en compte sont les suivants : la puissance du laser (W), le diamètre du spot laser (mm), la vitesse de déplacement de la buse (mm/s), distance entre deux couches (the hatch space) [8], le préchauffage, la température et le débit de poudre projetée dans la buse (g/min) ou encore, dans une moindre mesure, la pression du gaz de transport de la poudre. Ces paramètres affecteront la qualité du laser cladding car ils ont une influence notable sur la qualité métallurgique. Avec les bons paramètres de stratégie, cette technologie peut offrir une bonne qualité de surface avec une distorsion et une dilution minimales. En outre, différents métaux peuvent être mélangés à de la poudre de placage afin que le LC puisse fonctionner avec une grande variété d'alliages.

Une grande partie de la recherche se concentre maintenant sur le développement de machines automatiques de laser cladding. De nombreux paramètres du processus doivent être réglés manuellement et nécessitent donc l'attention d'un technicien spécialisé pour garantir des résultats corrects. Le laser cladding doit donc être effectué avec une main d'oeuvre qualifiée.

Cependant, de nombreuses entreprises concentrent leur attention sur le développement de capteurs permettant de mesurer le processus en ligne. Ces capteurs surveillent la géométrie de la gaine, les propriétés métallurgiques (telles que le taux de solidification, et donc la microstructure finale) et les informations sur la température. Grâce à ces capteurs, des stratégies de contrôle sont conçues de telle sorte que l'observation constante d'un technicien n'est plus nécessaire pour produire un produit final de qualité.

## 4.3 Avantages et inconvénients

L'un des principaux avantages de ce procédé est que le cladding permet l'obtention d'une faible ZR et ZAT réduite (de 0,05 à 2 mm) contrairement aux procédés actuels. On a une faible dilution entre la piste et le substrat (contrairement à d'autres procédés de soudage et à une forte liaison métallurgique).

### Les différentes zones lors d'un soudage

Lorsqu'on parle de soudage et donc par extension de cladding, on parle souvent de zone fondue, de ZAT et de zone revenue, qui correspondent à trois zones distinctes dans un composant soudé. Nous donnons ci-dessous une définition générale de ces zones.[2]

- la Zone Fondue (ZF) : "*c'est la zone où la température est supérieure au solidus de l'acier considéré ou du métal d'apport. La composition du métal fondu résulte de la chimie du métal d'apport, de la chimie du métal de base et des interactions avec l'environnement. Cette zone est séparée de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) par la ligne de fusion qui caractérise l'ensemble des points ayant atteint la température de solidus.*" [2]

- La Zone Affectée Thermiquement (ZAT) : de manière très générale, c'est la zone solide de l'assemblage soudé où le comportement du matériau est fortement influencé par le champ de température dû au soudage. Le terme ZAT a une signification toute particulière lorsque le matériau du métal de base ou du métal d'apport subit des transformations structurales : c'est la zone où la transformation a lieu. Cette Z.A.T se décompose elle-même en trois grandes parties :
  - la zone où la transformation est complète ;
  - la zone où la transformation est partielle ;
  - la zone revenue (Z.R) où la température maximale atteinte est légèrement inférieure à la température de début de transformation mais où le comportement du matériau est légèrement modifié par rapport à celui du métal de base.
  
- La zone non affectée thermiquement : "*de manière très générale, c'est la zone solide de l'assemblage soudé où le comportement du matériau est peu influencé par le champ de température. Pour les matériaux subissant des transformations structurales, il s'agit de la partie de l'assemblage soudé où la température maximale atteinte est bien inférieure à la température de début de transformation et où l'opération de soudage n'engendre pas de modification des caractéristiques métallurgiques et mécaniques du métal de base.*"[2]

Des études montrent que c'est la meilleure technique pour le revêtement de toute forme. Avec ce procédé, on a une nette augmentation de la durée de vie des pièces d'usure.

Mais l'application la plus utilisée est la réparation des pièces usées ou endommagées, ce qui est un énorme avantage notamment sur le plan économique. Si le moule de la pièce n'existe plus ou si le temps nécessaire à une nouvelle fabrication est trop long, Le laser cladding est idéal. Ou alors, l'ajout de nouvelles fonctionnalités sur des pièces existantes comme la création de nervures, de bossages sur des carters, etc.

On observe également des taux de refroidissement élevés, ce qui implique une microstructure fine, une grande flexibilité des matériaux (métal, céramique, voire polymère). La pièce construite est exempte de fissure et de porosité.

Un autre avantage important est de pouvoir concevoir des pièces d'une grande dimension et ce à plus grande vitesse<sup>1</sup> de fabrication par rapport aux procédés de fusion sur lit de poudre.

Comme expliqué précédemment, Le laser cladding est un des seuls procédés de FA à pouvoir utiliser un système d'alimentation qui peut être équipé de plusieurs réservoirs offrant la possibilité d'injecter différentes poudres de matériaux différents.

Enfin, la large gamme de matériaux utilisables disponibles sur le marché est un atout indéniable.

---

1. une vitesse pouvant atteindre 100 à 200  $cm^3/h$ .

## 4.4 Matériaux

Les types de matériaux qui forment la base sont des alliages :

- carbone-manganèse ;
- acier (inoxydable) ;
- alliage titane ;
- cuivre ;
- le domaine verrier ;
- etc.

Et le clad est généralement en :

- alliages de cobalt ;
- fer ;
- nickel ;
- acier inoxydable martensitique ;
- carbure de tungstène ;
- bronze ;
- cobalt (verrerie)
- etc.

## 4.5 Applications

Cette technologie est souvent utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques ou pour réparer les pièces (de grande valeur) usées et fabriquer des éléments composites à matrice métallique. Le matériau de surface peut être revêtu au laser directement sur un composant fortement sollicité, c'est-à-dire pour réaliser une surface auto-lubrifiante.

Les propriétés mécaniques qui peuvent être améliorées sont : la résistance à diverses sollicitations telles que l'abrasion métallique (outils de travail à chaud, pièces de pompe, équipements de sidérurgie tels que lames de cisaille, poinçons et matrices de presse à découper, outils de presse, pistons) ou minérale (équipements agricoles, manutention de sables / bétons, broyeurs, mélangeurs), le choc (outils de percussion, marteaux, batteurs de pieux), le frottement, la pression (équipements de terrassement, d'excavation, chemins de roulement, laminage), la cavitation, la résistance à la corrosion (surfaces exposées aux agressions chimiques : équipements sous pression, éléments de chaudières) et/ou une combinaison de ces sollicitations y compris aussi pour des raisons esthétiques.

Le cladding peut être également vu comme le moyen de protéger localement un élément ou une partie d'élément contre les agressions rencontrées pendant la durée de vie normale de la pièce. Le laser cladding est donc une réponse précise apportée à un mode de sollicitation identifié. Le cladding peut donc à la fois prévenir et guérir.

La figure 4.4 [10] illustre le fonctionnement du laser cladding.

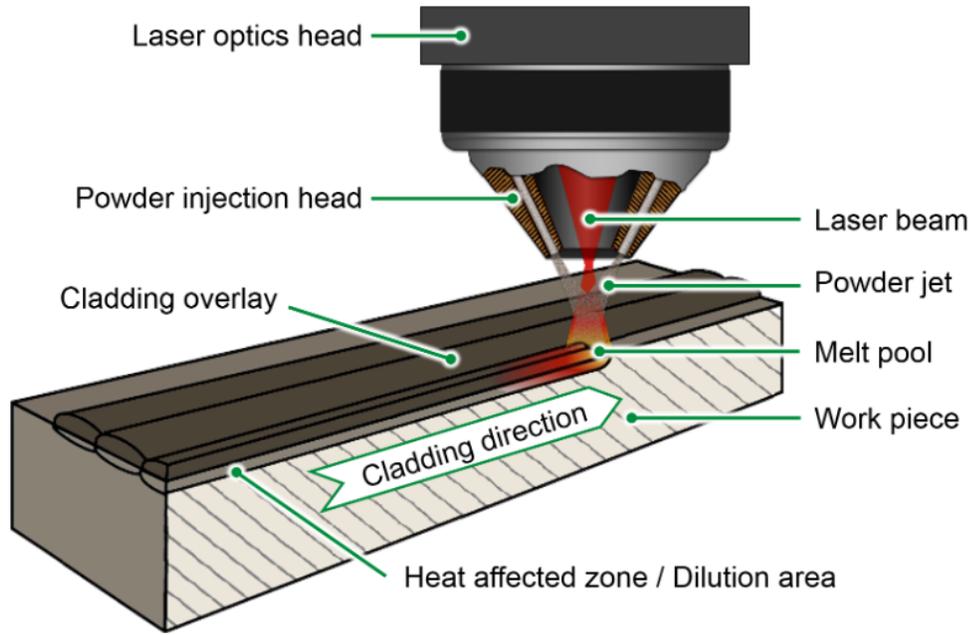


FIGURE 4.4 – Illustration 3D du procédé de laser cladding [10]

# Chapitre 5

## Matériau *HSS M4*

Le matériau utilisé est de l'acier HSS (High-speed steel) M4 c'est-à-dire de l'acier rapide (AR). Il désigne les aciers à outils ayant la capacité de conserver leur trempe à haute température. Ils sont souvent employés pour la découpe à haute vitesse (ex :foret, ...).[42]

Les teneurs en carbone et en alliage des aciers rapides sont équilibrées à des niveaux permettant d'obtenir une réponse de durcissement élevée ( $> 60$  HRC<sup>1</sup>), une résistance à l'usure élevée (notamment grâce au tungstène et au vanadium élément producteur de carbures), une résistance élevée à l'effet de ramollissement de la chaleur et une bonne ténacité<sup>2</sup> pour une utilisation efficace dans les opérations de coupes industrielles, par exemple. Les aciers rapides (HSS) sont fabriqués avec le traitement de fusion de l'acier classique, qui comprend la solidification des lingots, le forgeage ou le laminage, les traitements thermiques et les contrôles de qualité finaux.[12]

### 5.1 Composition chimique

La composition chimique de la poudre HSS M4 utilisée est reprise dans le tableau ci-dessous :

C	Cr	Mo	V	W	Mn	Ni	Si	Fer
1,35	4,30	4,64	4,10	5,60	0,34	0,90	0,33	balanced

TABLE 5.1 – Composition chimique du HSS M4 utilisé

En quelques mots, la nature de ces éléments nous indique qu'ils sont tous plutôt durs et possèdent une température de fusion élevée.

---

1. Dureté Rockwell.

2. propriété d'un matériau à résister à la propagation de fissures.

## 5.2 Comment fabrique-t-on les HSS ?

Les matières premières sont constituées de chutes d'aciers rapides et de ferro-alliages que nous plaçons dans un four à arc électrique. Après la fusion dans le four à arc, le métal est transféré dans un convertisseur pour affinage<sup>3</sup>. Le métal liquide affiné est ensuite coulé en lingots. Les lingots sont alors mis au four avant d'être forgés à chaud par martelage ou par une presse. Le forgeage a transformé les lingots en billettes. On va ensuite chauffer ces billettes pour les laminier et obtenir les dimensions de la pièce voulue. La figure 5.1 illustre ce procédé.[11] [12] [13] [14]

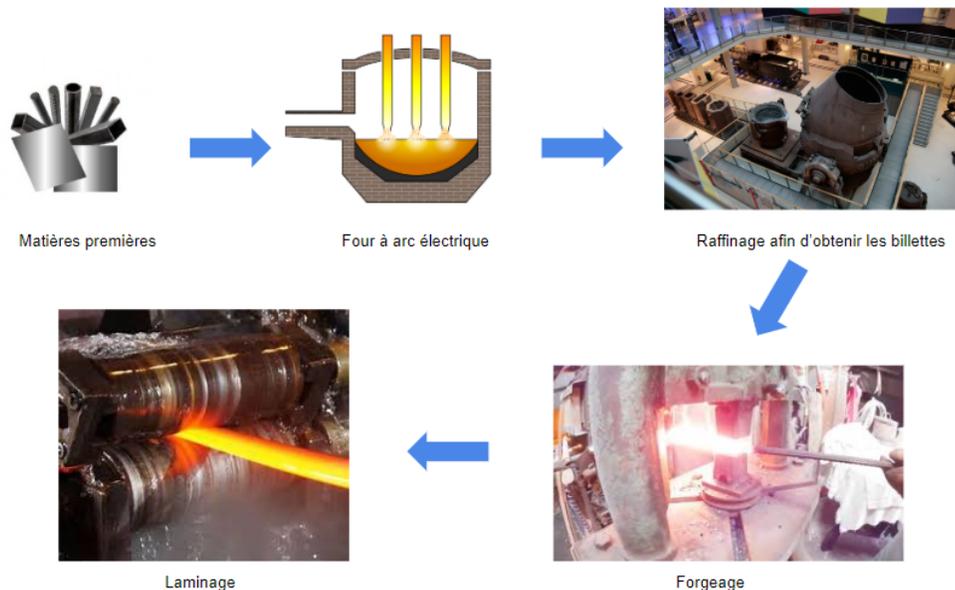


FIGURE 5.1 – Organigramme illustratif du procédé de préparation des HSS [11], [12], [13], [14]

## 5.3 Paramètres

Les contrôles de qualité finaux donnent lieu à des normalisations. Les aciers (super) rapides surcarburés au vanadium, également appelés HSS-E sont normalisés d'après la norme ISO 4957<sup>4</sup>. Selon la norme européenne EN 10027, ces nuances d'aciers rapides sont désignées par les lettres HS suivies, dans l'ordre, des teneurs en % massique de tungstène, molybdène, vanadium et cobalt.

Ces paramètres des HSS, comme pour tous les aciers, dépendent de la température assez régulièrement de façon non linéaire ce qui introduit donc des sources de non-linéarités dans le code éléments finis et qui impose une résolution non linéaire. En règle générale, pour la conductivité, la dépendance est presque linéaire. Par contre, on trouve que la fonction de

3. procédé de raffinage.

4. la norme française : NF A 35-573/4, EN HS6-5-4 (1.3351). NF Z130WDCV 06-05-04-04, AISI M4.

capacité thermique est non linéaire d'autant plus pour les températures les plus hautes.

En ce qui concerne la partie mécanique, le coefficient de dilatation thermique qui nous permet de calculer la déformation thermique est aussi fonction de la température. Nous avons également le module de Young qui lui aussi dépend de la température de façon non-linéaire surtout à haute température.

## 5.4 Revêtements

Divers revêtements déposés sur les aciers rapides peuvent améliorer leur tenue ainsi que leur qualité d'usinage notamment. Il existe un grand nombre de types de revêtements avec une mise en oeuvre pas toujours évidente (parfois sous vide, par exemple). Les revêtements les plus connus sont en TiN [43] [43] , TiCN [44], CrN [45], etc.

Les différents revêtements permettent d'obtenir des améliorations de propriétés mécaniques et thermiques importantes pour l'usage des aciers HSS tels que :

- amélioration de la dureté ;
- amélioration de l'état de surface de la pièce usinée ;
- augmentation possible de la vitesse de coupe et de l'avance ;
- accroissement de la durée de vie de l'outil ;
- meilleure résistance à l'abrasion et à la corrosion ;
- diminution du collage des copeaux à froid ;
- diminution du coefficient de frottement et échauffement ;
- très grande résistance à l'usure sur la dépouille des arêtes ;
- augmentation considérable des conditions de coupe ;
- grande productivité et optimisation de l'utilisation des machines.

## 5.5 Applications

Les principales applications de ces nuances d'aciers rapides sont :

- broches ;
- outils de coupe ;
- outils de taillage d'engrenage ;
- tarauds et matrices ;
- travail à froid.

L'acier HSS M4 peut être travaillé selon les procédés usinage rectification, tournage, fraisage, polissage, déformation plastique, électro-érosion et surtout de soudage avec, comme application particulière, la réparation précise de pièces endommagées.

## 5.6 Microstructure

La métallurgie est le domaine qui étudie les matériaux en fonction de leur température et pression. En effet un matériau, en fonction de sa température et de sa pression, peut être sous une phase différente et ainsi avoir des caractéristiques telles que :

- des propriétés mécaniques différentes ;
- des compositions différentes ;
- une organisation atomique différente (structure cristalline ou autre).

Pour le fer, les différentes phases métallurgiques sont :

- l'état gazeux ;
- l'état liquide ;
- différentes variétés allotropiques (structures cristallines)  $\simeq$  l'état solide.

Pour tous les aciers (alliages Fer-Carbone) on peut rencontrer deux types de phases métallurgiques :

- les solutions solides ;
- les composés définis.

Les solutions solides sont caractérisées par le caractère métallique de leurs liaisons inter-atomiques. Elles ont la même structure cristalline que le solvant.

En revanche, dans le cas des composés définis, les liaisons inter-atomiques perdent leur caractère métallique pour un caractère ionique. Leur structure cristalline est différente de celle du solvant.

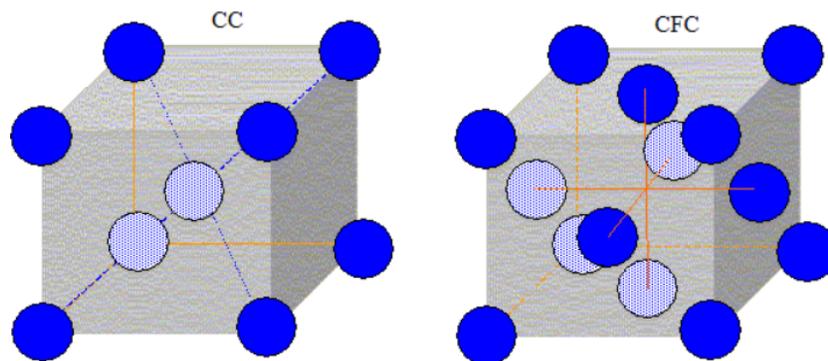


FIGURE 5.2 – Structure CC et CFC [15]

Selon la température et la pression, la structure du fer peut être cubique centrée (CC) (fer  $\alpha$  ou fer  $\delta$ ), cubique à face centrée (CFC) (fer  $\gamma$ ) ou hexagonale (fer  $\epsilon$ ).

Pour les alliages Fer–Carbone, on distingue, à l'état solide, quatre phases métallurgiques différentes :

- la ferrite qui est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\alpha$ . Son réseau cristallin est CC ;[16]
- la cémentite qui est un carbure de fer de type composé défini de formule stœchiométrique  $Fe_3C$  dont la maille est orthorhombique ;[16]
- la perlite, *mélange hétérogène de ferrite et de cémentite à 0.85% en masse de carbone, peut être lamellaire ou globulaire. La perlite lamellaire est l'alternance de lamelles de ferrite et de cémentite dont l'épaisseur et les écarts dépendent de la vitesse de refroidissement tandis que la perlite globulaire est formée de petits globules blancs de  $Fe_3C$  de contour noir sur fond de ferrite ; [16]*
- l'austénite, *est une solution solide d'insertion de carbone dans du fer  $\gamma$  dont le réseau cristallin est CFC. C'est le constituant intermédiaire de durcissement par trempe, après chauffage (austénitisation) et avant refroidissement (trempe). Si la vitesse de refroidissement est trop rapide, la diffusion de carbone vers l'extérieur de l'austénite n'a pas le temps de se produire, par conséquent le carbone reste emprisonné dans la ferrite. Lorsque cette transformation intervient, la ferrite est sursaturée en carbone et donne la formation de structures bainitiques et martensitiques.[16]*

L'acier solide peut donc changer de phase et changer de réseau cristallin en fonction de la température et de la pression mais aussi de la vitesse de changement de température. Le changement de phase se fait par changement du réseau cristallin du fer et par le déplacement des atomes de solutés (carbone ou d'autres composés) qui :

- restent en solution ;
- précipitent<sup>5</sup> sous forme de carbures.

On distingue deux grandes familles de diffusion :

- la transformation diffusionnelle ;
- la transformation martensitique.

## Transformation par diffusion

Pour ces transformations, le déplacement des atomes de soluté est important. Cette transformation a donc besoin de temps. En effet, il faut laisser le temps aux atomes de se diffuser c'est pourquoi les transformations ne se produisent que pour des vitesses de variation de températures assez faibles. Pour ces mêmes raisons, la diffusion atomique est plus facile à haute température.

Les transformations par diffusion se déroulent toujours en deux étapes : la germination et la croissance. On observe d'abord l'apparition de germes qui interfèrent avec le cristal mère. Ensuite, la réaction se poursuit par progression de l'interface.

---

5. La précipitation est l'apparition de cristaux ou particules.

Dans le cas du soudage, les transformations au chauffage : austénitisation et au refroidissement de l'austénite en ferrite sont des transformations diffusionnelles.

## Transformation martensitique

Pour les aciers, lors d'un refroidissement rapide à partir des hautes températures où existe l'austénite, la diffusion n'a pas le temps de se produire et on obtient des solutions sursaturées en carbone. Ce changement de réseau cristallin se produit par cisaillement et sans variation locale de composition. On appelle cette transformation : la transformation martensitique.

N.B. : Pour des vitesses de refroidissement intermédiaires, on obtient un constituant hors d'équilibre qui s'appelle la bainite (transformations bainitiques).

## Diagramme d'équilibre et transformation suite au chauffage

Un diagramme de phases (ou diagramme d'équilibre) est un diagramme qui permet de résumer les constitutions d'équilibre d'un système d'alliage. Ce diagramme permet de donner, pour un mélange donné, la constitution des phases en présence en équilibre les unes avec les autres en fonction de la pression et de la température.

Ce diagramme n'est valable que pour des évolutions de températures lentes. Cependant, il est commode d'utiliser ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales lors du procédé de soudage.

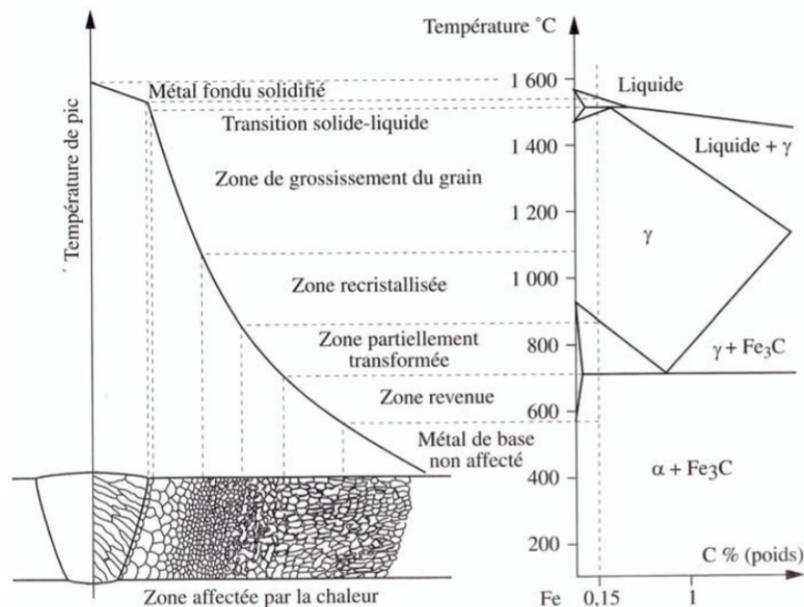


FIGURE 5.3 – Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé (Alliage Fe-0.15%C) [16]

Lors d'un soudage, le chauffage est fortement localisé. En partant d'une zone éloignée et en se rapprochant de la zone fondue, on rencontre successivement :

- le métal de base où les transformations de phases tel que l'austénitisation n'ont pas eu lieu. La température maximale est inférieure à la température d'austénitisation ;
- la ZAT où la température a atteint la température d'austénitisation. On y distingue deux zones :
  1. la zone d'austénitisation partielle, zone où la température maximale est inférieure à la température de fin d'austénitisation ;
  2. la zone d'austénitisation totale, zone où la température maximale est supérieure à la température d'austénitisation.
- le métal fondu pour lequel la température maximale est supérieure à la température de fusion.

En plus de ces modifications microstructurales, les opérations de soudage ont également une grande influence sur les précipités présents dans le métal de base. Cependant, dans le cadre de ce travail, ces phénomènes métallurgiques seront négligés.

## Evolution de la microstructure suite au refroidissement

Après avoir chauffé par diffusion dans le matériau et par échange avec l'air extérieur, la zone soudée refroidit. Dans le cas du laser cladding, elle refroidit puis elle est à nouveau chauffée suite aux passages du laser sur la couche suivante. Le clad subit donc des cycles de chauffés et de refroidissements. Prédire la microstructure est donc ardu. Il est cependant possible, en se servant de diagrammes préétablis, de prévoir les plages de température de transformation de phase et l'état métallurgique obtenu à partir d'un état austénitique initial. On utilise des diagrammes Transformation-Temps-Température mais surtout des diagrammes Transformation en Refroidissement Continu.

Différents facteurs influencent les transformations tels que :

- influence de la taille de grain de l'austénite ;
- influence de la teneur en carbone ;
- etc.

Comme le montre la figure 5.4, la microstructure est constituée de cellules (martensite avec peu d'austénite) entourées d'un réseau quasi-continu de carbures intercellulaires. La nature, la morphologie, la distribution de ces carbures, mais aussi la qualité de leur ancrage dans le matériau à travers l'interface carbure/matrice, vont fortement influencer le comportement mécanique de l'alliage. [1]

Les températures du liquidus et du solidus utilisées dans le modèle, respectivement 1677 K et 1503 K, ont été obtenues par simulation thermodynamique.[1]

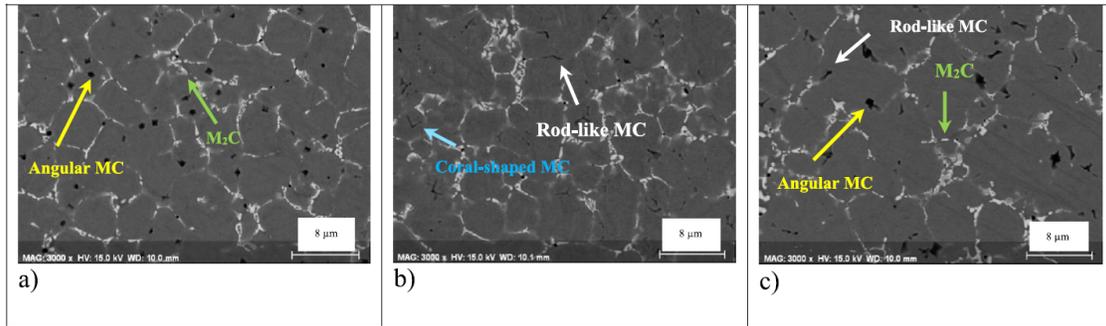


FIGURE 5.4 – a) MC en étoile et carbures intercellulaires M<sub>2</sub>C eutectiques lamellaires ; b) MC intracellulaire en forme de corail, M<sub>2</sub>C eutectique intercellulaire et cellules raffinées en raison de la fusion multiple ; c) MC angulaire grossier et M<sub>2</sub>C eutectique dans les zones intercellulaires. [1]

## 5.7 Recherches

Il existe beaucoup d'études sur les aciers HSS. De nombreux scientifiques s'accordent pour dire que les aciers HSS sont les aciers de demain. Il existe donc énormément de recherches sur ceux-ci. Ils ont des propriétés améliorées par rapport aux autres aciers, ce qui leur procure une durabilité nettement plus importante que les aciers traditionnels. De plus, ils ont un intérêt économique [46]. Des études montrent également que les outils en acier rapide traités cryogéniquement mettent en avant des changements microstructuraux dans le matériau [47]. Ces changements peuvent améliorer de manière encore plus significative la durée de vie et la productivité des outils. [42][48][49]

# Chapitre 6

## Modélisation Thermique

Dans ce chapitre se trouvent les explications des phénomènes physiques liés au laser cladding et sa modélisation éléments finis. Nous commençons par les phénomènes physiques qui nous permettent d'écrire les équations de bilan. Ensuite on identifie les conditions de chargement. Pour finir, les logiciels utilisés pour réaliser ce calcul seront présentés en quelques mots.

### 6.1 Problème à modéliser

Le problème à modéliser est un cas de laser cladding sur une pièce modélisée en 2D sur laquelle nous allons appliquer un flux chaleur afin de venir souder de la poudre. Le flux de chaleur progressera élément par élément, le laser est mobile. Nous devons donc faire face à deux grandes problématiques :

- un flux de chaleur mobile ;
- un phénomène d'ajout de matière à gérer.

La figure illustre 6.1 illustre ces deux problèmes.

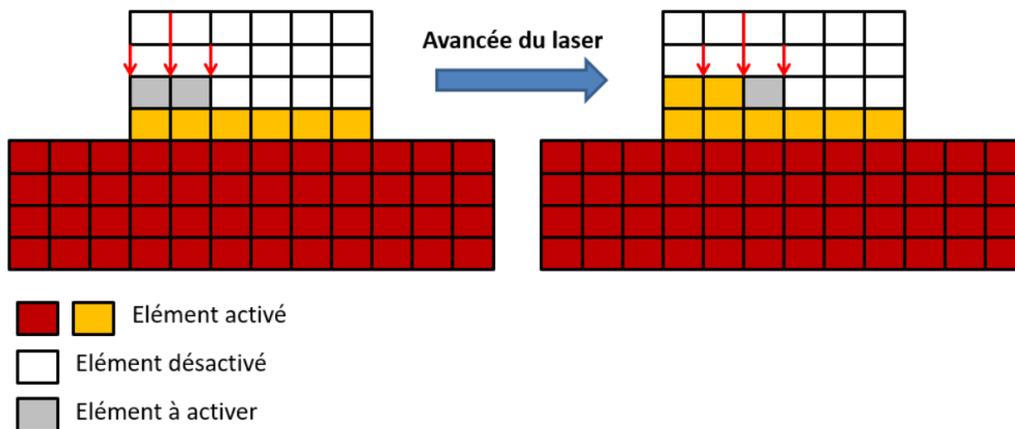


FIGURE 6.1 – Première illustration de l'activation et désactivation des éléments [17]

Cette figure a été modifiée et traduite en partant du power Point de S. Fetni, T. Niccolini, H-S Tran, T. Maurizi-Enrici Enrici, O. Dedry, Ruben Jardin, Laurent Duchêne, A. Mertens, A. M. Habraken intitulé 2D thermal finite element analysis of laser cladding of 316L + WC Composite coatings First work => Metal Forming 2020. Elle sera utilisée tout le long de ce travail [17].

## 6.2 Physique du problème

### 6.2.1 Conduction

Le premier phénomène mathématiquement modélisé est la distribution de la température à travers la pièce, aussi appelé conduction thermique.

La conduction thermique (ou diffusion thermique) est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact et se réalisant sans déplacement global de matière. [50]

Ce phénomène est analogue au phénomène de diffusion, il s'agit d'une transmission de l'agitation thermique de proche en proche.

Voici l'équation de conduction et elle est donnée [51] pour le cas 2-D par :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial t}$$

où :

- $T(x,y,t)$ , la température [K] ;
- $\lambda(T)$ , la conductivité thermique<sup>1</sup> [ $\frac{W}{K.m}$ ] ;
- $c_p$ , la capacité thermique apparente ou capacité thermique massique [ $\frac{J}{kg.K}$ ] ;
- $\rho(T)$ , la masse volumique [ $\frac{kg}{m^3}$ ] ;
- le facteur  $\rho \cdot c_p$  est aussi appelé capacité thermique [ $\frac{J}{m^3.K}$ ] ;
- $Q$ , la puissance générée par unité de volume dans la pièce, [ $\frac{W}{m^3}$ ] ;
- $t$ , le temps [s].

Cette équation vient de la loi de Fourier : la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température. On a un transfert spontané d'une région de température élevée vers une région de température basse.

---

1. le plus souvent isotrope.

### 6.2.2 Conditions limites

Les conditions limites de flux de chaleur imposées sont des conditions de type Neumann.

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = g(x, t)$$

où :

- $g(x,t)$  est une fonction de la variable d'espace et du temps ;
- $n$  la normale à la frontière.

Ce système est incomplet. En effet, l'équation de la chaleur est complète seulement lorsqu'on définit les conditions limites. On distingue deux types de conditions limites :

- Neumann ;
- Dirichlet.

Ces conditions limites sont le flux de chaleur que nous allons appliquer pour faire fondre la poudre ainsi que des conditions d'échanges avec l'air ambiant. Ces dernières auront tendance à refroidir la pièce. Gérer ces conditions limites n'est pas trivial et demande une attention particulière. La figure 6.2 illustre ce phénomène. A chaque pas de temps, le laser progresse, les conditions limites sont donc changées et il faut également activer les éléments.

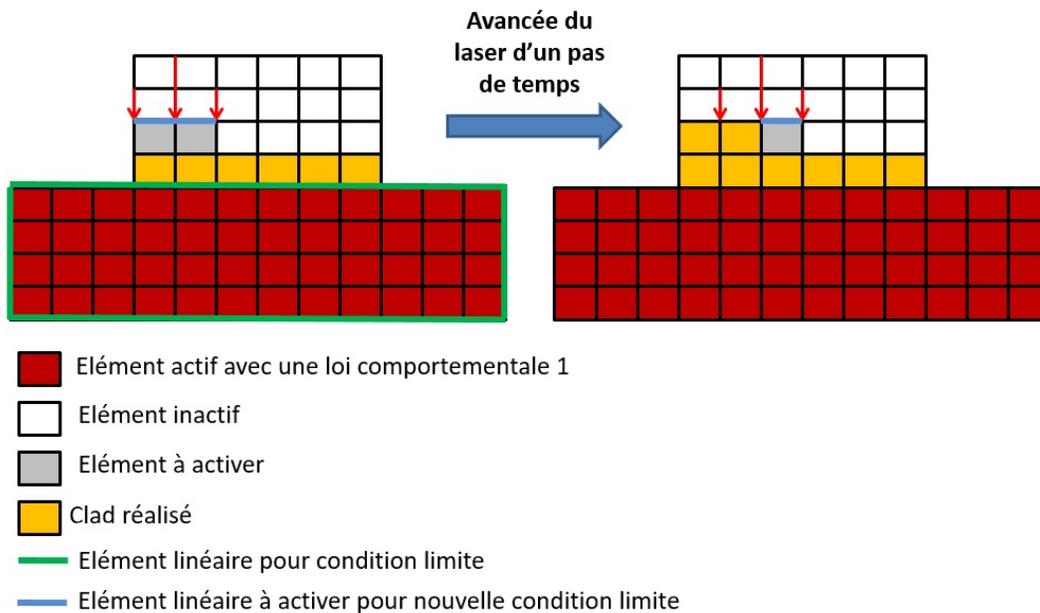


FIGURE 6.2 – Illustration du procédé d'activation des éléments avec les conditions limites[17]

## Conduction $\lambda$

La conduction est un phénomène physique de transfert de chaleur qui dépend directement de la conductivité thermique notée  $k$ ,  $K$  ou parfois  $\lambda$  et qui est fonction de la température parfois de façon non linéaire et non monotone. Elle représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin ou 1 degré Celsius par mètre.[50]

## Capacité thermique massique $c_p$

La capacité thermique massique aussi appelée chaleur massique ou chaleur spécifique est la capacité thermique d'un matériau rapportée à sa masse. C'est une grandeur qui reflète la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique, pour une masse donnée, quand sa température augmente. Une grande capacité thermique signifie qu'une grande quantité d'énergie peut être stockée, moyennant une augmentation relativement faible de la température. [52]

A pression constante, la capacité thermique isobare massique écrite  $c_p$  correspond physiquement à la quantité de chaleur  $\delta Q$  que l'on doit lui fournir pour élever sa température de un kelvin pour une masse de 1 kg, en partant de  $T$ . [53]

Dans le cadre de cette étude, la différence entre la capacité thermique isochore et isobare est négligeable. Cela ne serait pas le cas pour une étude de mécanique des fluides.

### 6.2.3 Convection $h$ et rayonnement $\epsilon$

La convection désigne l'ensemble des mouvements internes qui animent un **fluide**. Ces mouvements impliquent des échanges de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact. La convection constitue, avec la conduction thermique et le transfert radiatif, l'un des trois modes d'échange de chaleur entre deux systèmes et diffère de ces derniers par la méthode de transfert. [54]

Le coefficient de convection, aussi appelé coefficient de transfert thermique  $h$ , dépend de la nature du fluide, de la température de celui-ci ainsi que du type d'écoulement.

L'expression du flux de chaleur en convection généré par un écoulement à une température  $T_e$  sur une surface  $T_s$  est donnée par la loi de Newton :

$$-\lambda.(\nabla T.\mathbf{n}) = h.(T_s - T_e)$$

avec :

—  $h$  est le coefficient de convection  $[\frac{W}{m^3.K}]$ .

## Coefficient de convection thermique $h$

Le coefficient de transfert thermique ou coefficient de transmission thermique ou encore coefficient de convection thermique est un coefficient quantifiant le flux d'énergie traversant un milieu, par unité de surface, de volume ou de longueur pour des études 3D. [55]

C'est un terme important dans l'équation d'un transfert thermique et il permet d'indiquer la facilité avec laquelle l'énergie thermique passe un obstacle ou un milieu. Il permet de calculer l'intensité de l'énergie échangée par unité de surface et unité de temps en fonction de la différence de température de part et d'autre de la surface d'échange. [55]

Ce coefficient s'applique uniquement sur la frontière du domaine, c'est une condition limite.

Le coefficient de transfert thermique est défini par :

$$h = \frac{Q}{A \cdot \Delta T \Delta t}$$

avec :

- $Q$  : énergie transférée [J] ;
- $A$  : surface d'échange [ $m^2$ ] ;
- $\Delta T$  : différence de température de part et d'autre de la surface d'échange [K] ;
- $\Delta t$  : intervalle de temps (s).

Plus ce coefficient est grand, plus le transfert thermique est grand.[55]

## Rayonnement

Le rayonnement thermique est un rayonnement électromagnétique généré par l'agitation thermique de particules dans la matière quel que soit l'état de celle-ci. [56]

Ce terme fait naturellement référence à une émission de photons dont l'intensité varie avec la température. On lui associe généralement la possibilité d'obtenir un rayonnement de type corps noir. Toute matière dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement thermique.

La convection et le rayonnement sont des conditions aux limites. L'expression mathématique est la suivante[51] :

$$-\lambda \cdot (\nabla T \cdot \mathbf{n}) = - \underbrace{h(T - T_0)}_{\text{Convection}} - \overbrace{\epsilon \sigma (T^4 - T_0^4)}^{\text{Rayonnement}}$$

où :

- $\mathbf{n}$ , le vecteur normal de la surface ;
- $\sigma$ , la constante de BOLTZMAN [ $\frac{W}{m^2 K^4}$ ] ;

- $\epsilon$ , l'émissivité [-];
- $h(T)$  le coefficient de convection [ $\frac{W}{m^2K}$ ].

Cette équation va nous permettre de représenter le laser qui chauffe la pièce par ces phénomènes physiques appliqués aux clads. La formulation de l'apport de chaleur est alors modélisée par une modification de cette dernière expression, on obtient alors :

$$-\lambda.(\nabla T.\mathbf{n}) = q_{Laser} - h(T - T_0) - \epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$$

Avec  $q_{Laser}$  l'énergie du laser par unité de surface [ $\frac{W}{m^2}$ ].  $q_{Laser}$  est défini par :

$$q_{Laser} = \beta.I(x, y, U, t)$$

- $\beta$ , le facteur d'absorption;
- $I$ , l'intensité [ $\frac{W}{m^2}$ ];
- $U$ , la vitesse du laser [ $\frac{m}{s}$ ].

L'intensité est donnée notamment par la loi de Stefan-Boltzmann, la théorie des corps noirs et la loi de Planck.

La conductivité thermique, la densité et la capacité thermique spécifique ont été mesurées pour des échantillons extraits du dépôt et du substrat (cf. section 8.9 pour les valeurs). Le facteur d'émissivité  $\epsilon$  du rayonnement a été fixé à 1 et un coefficient de convection  $h$  de 230  $W/m^2K$  a été appliqué pour l'aluminium et 4 pour l'acier. Les températures du liquidus et du solidus utilisées dans le modèle, respectivement 1677 K et 1503 K, ont été obtenues par simulation thermodynamique. [1]

## 6.3 Modélisation

### 6.3.1 Cas particulier du laser cladding

Du point de vue de la modélisation, repartons de l'équation de la chaleur écrite sous la forme locale avec une source de chaleur donnée  $r(x,t)$  à savoir :

$$\dot{\beta}(T) - \text{div}(\lambda \nabla T)(x, t) = r(x, t)$$

Sachant que l'enthalpie  $\beta$  en l'absence de changement de phase est donné par :

$$\dot{\beta}(T) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}(x, t)$$

Cette équation doit être complétée par une condition limite sur tous les points du domaine. Il existe deux possibilités : un flux de chaleur imposé sur une surface ou une température imposée.

$$-\lambda \nabla T n = q$$

Il faut également y imposer des conditions initiales. A savoir imposer une température initiale (en  $t=0$ ) sur le domaine.

$$T(x, 0) = T_0(x)$$

Dans notre étude, on a imposé la température initiale à 285,15 K dans *Lagamine* et 12°C dans *code\_aster* .

De là, il est possible d'écrire un équilibre thermique<sup>2</sup> puis d'obtenir la formulation faible du problème thermique.

## A propos de la source de chaleur :

Il existe plusieurs méthodes pour la modéliser, la plus simple étant une modélisation triangulaire comme expliqué en section 8.12 et la plus complexe étant la fonction de Goldak [57]. Il est important de retenir que ce paramètre est fonction de :

- la vitesse de déplacement ;
- la puissance ;
- les paramètres qui modélisent cette source.

En plus de cette condition, il faut également tenir compte des phénomènes de transferts convectifs ainsi que de rayonnement sur le domaine. Ces derniers chargements sont indispensables alors que le terme de flux imposé n'est pas obligatoire pour réaliser une étude.

Enfin, ajoutons que des sources de non linéarité sont introduites via les lois comportementales des matériaux. En effet, les données thermiques sont principalement représentées par la conductivité  $\lambda$  et la capacité thermique  $\rho C_p$  qui sont dépendantes de la température de manière non linéaire comme illustré à la section 8.9.

---

2. en supposant les grandeurs indépendantes du temps.

## 6.4 Logiciels utilisés

### 6.4.1 *Lagamine*

Le code éléments finis *Lagamine* sera utilisé pour effectuer la simulation mathématique. Le programme a été développé en interne au département ArGenCo de l'Université de Liège depuis 1982. Il a été initialement conçu pour simuler le processus de laminage [58].

Il s'agit d'un code lagrangien non linéaire qui permet de réaliser ,entre autres, des simulations thermiques, mécaniques et métallurgiques. La Figure 6.3 est un organigramme d'utilisation du programme *Lagamine* .<sup>3</sup>

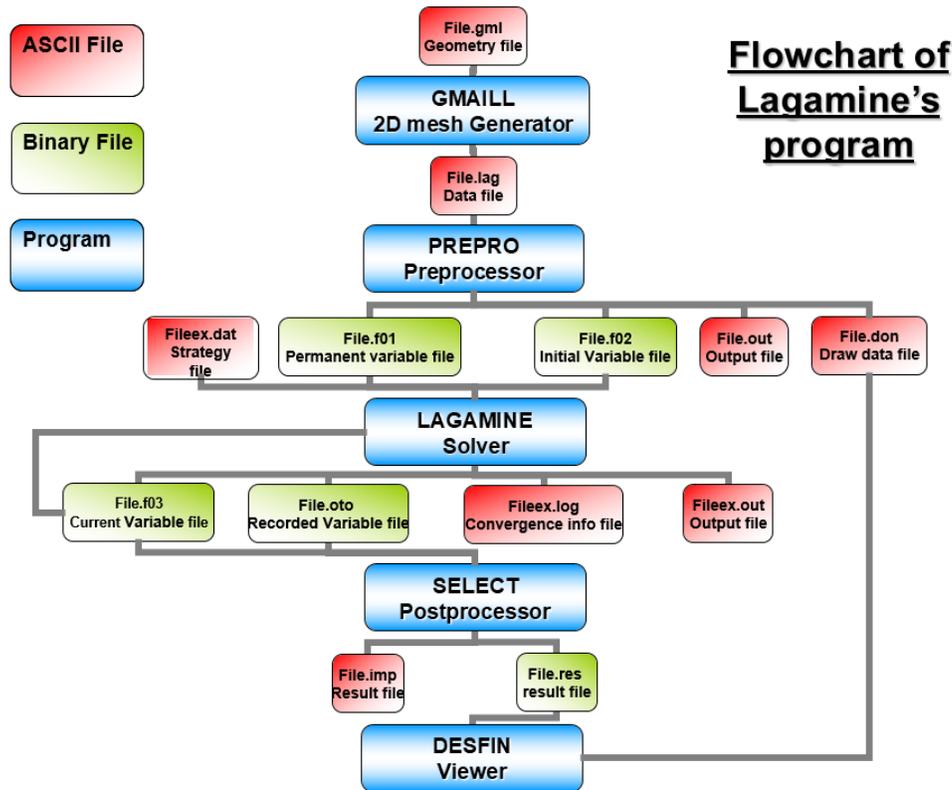


FIGURE 6.3 – Organigramme de l'utilisation du programme Lagamine

Nous devons éditer 2 fichiers textes. L'un comprenant les données initiales du problème tels que les noeuds et leurs positions, les différentes lois étudiées, le maillage ainsi que le type d'élément initialement utilisé, etc. Le second contient la stratégie de résolution et de chargement à appliquer, typiquement les paramètres numériques et le type de mise en charge. Ce second fichier sert aussi à préparer les résultats à afficher.

3. donné par le professeur L. Duchêne.

### 6.4.2 GID

Le GiD a été développé par le centre international des méthodes numériques en ingénierie (CIMNE)<sup>4</sup>, un centre de recherches dont le siège est à Barcelone (Espagne). Le CIMNE a été créé en 1987, lié à la prestigieuse Université technique de Catalogne (BarcelonaTech). Le CIMNE est spécialisé dans le développement et les applications de méthodes numériques et de logiciels pour trouver des solutions à une variété de problèmes en ingénierie et en sciences appliquées [59].

GiD est un pré et post processeur universel, adaptatif et convivial pour les simulations numériques en sciences et en ingénierie[60]. Il a été conçu pour couvrir tous les besoins courants dans le domaine des simulations numériques, du pré-traitement au post-traitement. Le Gid a principalement été utilisé en post traitement du calcul *Lagamine* . Il offre également la possibilité de visualiser et d’animer les résultats sur plusieurs maillages, en combinant différents styles de visualisation et résultats[59].

Dans le cadre de ce travail, le Gid a exclusivement été utilisé pour des applications de post processing afin d’afficher les résultats de *Lagamine* .

### 6.4.3 *code\_aster*

Le *code\_aster* , acronyme pour Analyses des Structures et Thermo-mécanique pour des Études et des Recherches, est un logiciel libre de simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis, utilisé et développé par EDF (Electricité de France) principalement dans leur département R&D.

Son développement a commencé en 1989. En 2001, EDF a pris la décision assez inhabituelle, pour un logiciel de cette taille et de cette envergure, de le placer sous licence GNU GPL.

Le cœur du système est codé en Fortran et de nombreux modules complémentaires sont réalisés en Python<sup>5</sup>. Il comporte plus d’un million de lignes de code, de nombreux cas de tests, ainsi qu’une énorme documentation. Des versions stabilisées sont diffusées environ deux fois par an sous forme de packages à compiler. Ces versions peuvent être mises à jour hebdomadairement vers la dernière version de développement. [61]

Il peut traiter les phénomènes mécaniques, thermiques ainsi que les couplages dans toutes sortes d’analyses : statique linéaire, statique ou dynamique non linéaire, thermique et autres.

Son installation est assez compliquée car les versions windows disponibles ne disposent pas de toutes les fonctions requises à des études d’une complexité relativement élevée telles que Le laser cladding. Il faut donc utiliser une virtual box et passer son ordinateur sous linux. La version de linux utilisée dans le cadre de ce travail a été Ubuntu 18.04.

---

4. [www.cimne.com](http://www.cimne.com)

5. Python doit être installé ainsi que de nombreux autres packages pour faire fonctionner *code\_aster* .

## Virtual box

Oracle VM VirtualBox (anciennement VirtualBox) est un logiciel libre de virtualisation publié par Oracle. [62]

Ce logiciel a pour but de créer un nouvel ordinateur virtuel à partir de notre machine. Ce procédé est utilisé afin de pouvoir avoir sur un même ordinateur plusieurs systèmes d'exploitation. La machine hôte représente la machine physique qui va "héberger" une ou plusieurs machines virtuelles. Ma machine physique a pour système d'exploitation Windows 10 et pour l'utilisation du *code\_aster* nous avons besoin de Linux. Ma machine virtuelle devra donc comporter Linux et le logiciel utilisé est Ubuntu 18.04.

## Ubuntu

Ubuntu est un système d'exploitation GNU/Linux basé sur la distribution Linux Debian. Il est développé, commercialisé et maintenu pour les ordinateurs individuels par la société Canonical.[63]

Ubuntu se définit comme « un système d'exploitation utilisé par des millions de PC à travers le monde » et avec une interface « simple, intuitive, et sécurisée ».[63]

La version utilisée est la version principale stable dite LTS. La dernière version 18.04, nom de code « Bionic Beaver », est sortie le 26 avril 2018. C'est la version recommandée sur le site de Canonical pour le grand public.[63]

### 6.4.4 Gmsh

Gmsh est un générateur de maillage 3D à éléments finis open source avec un moteur de CAO et un post-processeur intégré. Son but est de fournir un outil de maillage rapide, léger et convivial avec des entrées paramétriques et des capacités de visualisation avancées. Gmsh est construit autour de quatre modules : géométrie, maillage, solveur et post-traitement. La spécification de toute entrée dans ces modules se fait soit de manière interactive à l'aide de l'interface utilisateur graphique, soit dans des fichiers texte ASCII utilisant le langage de script propre à Gmsh (fichiers .geo), soit en utilisant l'interface de programmation d'application (API) C++, C, Python ou Julia [64].

Gmsh : un générateur de maillage tridimensionnel à éléments finis avec des installations de pré et post-traitement intégrées par Christophe GEUZAINÉ et Jean-François REMACLE, est une entreprise privée [64].

Gmsh peut produire une géométrie et la convertir en un maillage utilisable. Cela se fait généralement dans sa propre interface graphique, mais peut tout aussi bien se faire de manière scriptée, sans sortie graphique.

Gmsh peut également lire, manipuler et afficher les résultats dans son interface graphique.

Dans le cadre de ce travail, GMSH a été utilisé pour convertir un fichier de données au format .MED. Format lisible par *code\_aster* .

### 6.4.5 SALOME\_MECA

SALOME est l'acronyme de "Simulation numérique par Architecture Logicielle en Open source et à Méthodologie d'Evolution". SALOME est un logiciel open-source qui fournit une plateforme générique de pré et post-traitement pour la simulation numérique. Il est basé sur une architecture ouverte et flexible composée de composants réutilisables. Il s'agit d'une entreprise commune du CEA3, d'EDF et d'OPEN CASCADE.

"SALOME est un logiciel comprenant plusieurs modules destinés à la réalisation de la simulation numérique. C'est un bundle<sup>6</sup> qui permet d'exécuter *code\_aster* dans SALOME d'une manière simple. Il permet de faire des études dans une seule interface graphique! AsterStudy est un module de SALOME\_MECA qui, entre autres fonctionnalités utiles, facilite la construction du fichier de commande en automatisant certaines vérifications de la syntaxe.

SALOME ne contient pas de solveur physique mais fournit l'environnement informatique nécessaire à leur intégration. SALOME sert de socle pour la création de plateformes disciplinaires suivantes, comme SALOME\_MECA (contenant *code\_aster*), SALOME\_cfd (avec *code\_saturne*) et SALOME-HYDRO (avec TELEMAC-MASCARET)".[65]

Voici la liste des modules disponibles dans la version utilisée : SALOME 9.4 :[65]

- Shaper : modeleur CAO paramétrique et variationnel pour la création de modèles géométriques en simulation physique dans le domaine industriel, compatible avec les formats STEP, IGES et BREP ;
- SMESH : générateur de maillages, compatible avec les formats UNV, MED [archive], STL, CGNS, SAUV et GMF, qui contient notamment la suite MeshGems [archive] (développée par la société Distene [archive], sous licence payante), les algorithmes NetGen [archive], des fonctions de manipulation et des opérations de contrôle de qualité des mailles ;
- HOMARD : module d'adaptation de maillage par découpage de mailles en fonction d'un critère donné (zone, critère d'erreur donnée par le calcul physique, etc.) ;
- MEDCoupling : bibliothèque de manipulation de maillages et de champs, accessible uniquement en script Python (sans interface graphique) ;
- ParaViS : module de visualisation scientifique avancée, sur la base du logiciel libre ParaView développée par la société Kitware ;
- Melissa : bibliothèque de post-traitement statistique à la volée pour les études de sensibilité, accessible uniquement en script Python (sans interface graphique) ;
- YACS : orchestrateur de calculs ;
- ADAO : module d'assimilation de données et de calage de paramètres ;
- PERSALYS : interface graphique pour le pilotage d'OpenTURNS [archive], outil de traitement d'incertitudes et d'analyse statistique ;
- EFICAS : module de création d'interfaces de mise en données et de validation dynamique des jeux de données ;
- JobManager : module de lancement de calculs à distance.

---

6. ensemble de produits.

# Chapitre 7

## Première comparaison des 2 logiciels

Ce chapitre a pour but d'introduire la comparaison des deux logiciels avant l'étude du procédé de laser cladding par les deux codes. Comme première comparaison, nous effectuons un exercice simple de mécanique sur les deux codes.

### 7.1 Données de l'exercice

L'exercice à réaliser sur les deux logiciels est un exercice assez simple d'une plaque de  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  simplement appuyée sur deux côtés comme illustré à la figure 7.1.

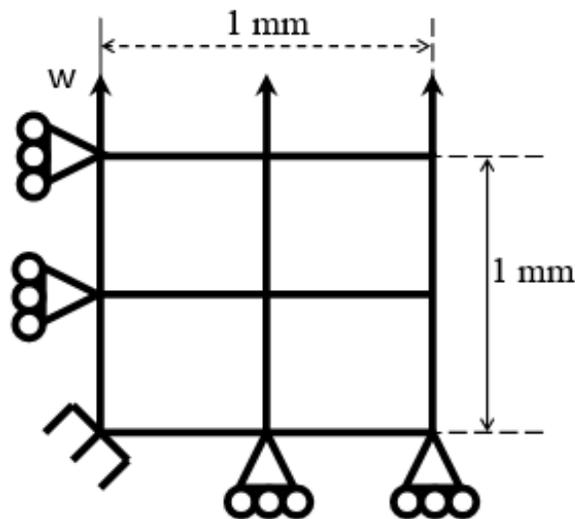


FIGURE 7.1 – Géométrie du problème

Les appuis sont de simples appuis à roulement. On demande de modéliser cette plaque à l'aide de quatre éléments finis. La loi de comportement du matériau est une loi élasto-plastique avec écrouissage linéaire (isotrope) comme illustré à la figure 7.2 dont les données sont reprises dans la table 7.1

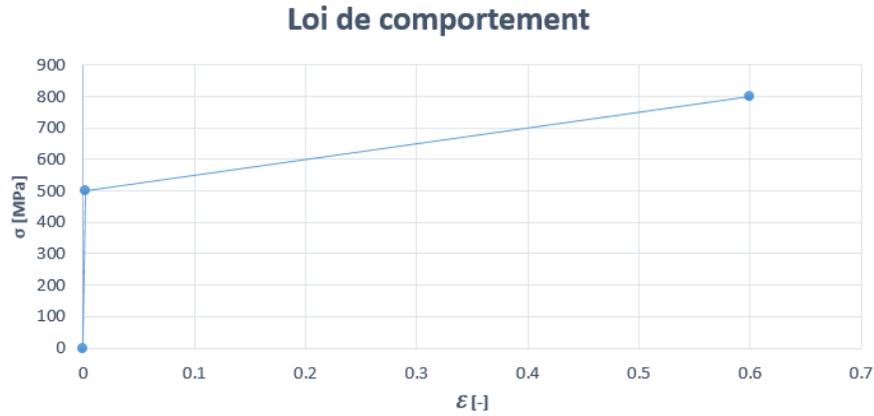


FIGURE 7.2 – Loi de comportement de l’acier étudié

E [GPa]	$E_t$ [MPa]	$\nu$	$\sigma_y$ [MPa]	$\epsilon_u$	$\sigma_u$ [MPa]
210	502	0,3	500	0,6	800

TABLE 7.1 – Données de la loi de comportement

Le chargement à appliquer à cette plaque est un chargement cyclique à déplacement imposé comme illustré à la figure 7.3. On impose un déplacement  $w$  de  $+0,05$  à  $-0,05$  sur un intervalle de temps de 1 seconde.

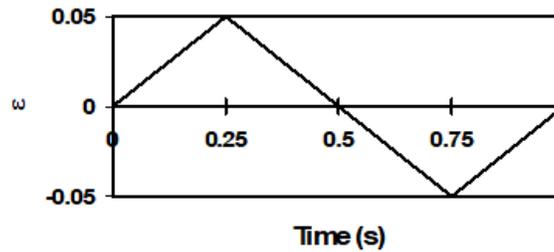


FIGURE 7.3 – Représentation du chargement cyclique

## 7.2 Analyse des résultats

En appliquant le chargement, soit le déplacement imposé (figure 7.3), de façon linéaire constante avec 100 pas pour les deux différents codes, nous obtenons bien deux courbes des déformations, en fonction du temps, qui se superposent parfaitement. En effet, afin de pouvoir comparer les courbes de manière rigoureuse, nous devons suivre les mêmes hypothèses. Le déplacement imposé dans le *code\_aster* doit donc être le même que celui imposé dans *Lagamine* avec le même nombre de pas et le même intervalle entre ces pas. Ce qui est bien le cas, comme illustré figure 7.4.

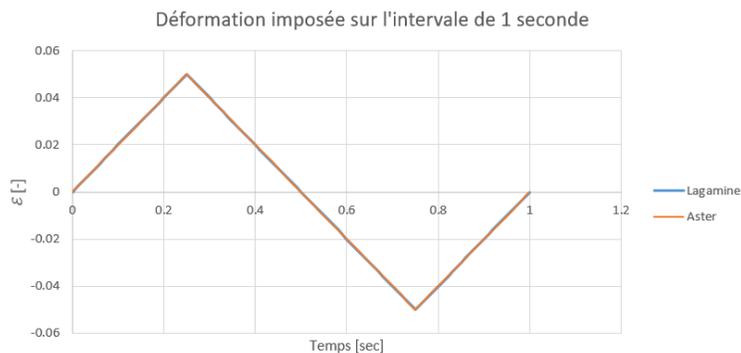


FIGURE 7.4 – Graphique de la déformation de la pièce  $\epsilon_{yy}$  de métal en fonction du temps

Comme expliqué précédemment, on remarque que les deux courbes se superposent parfaitement. C'est ce qui était attendu.

Nous pouvons maintenant étudier la contrainte en fonction du temps, cette partie va mettre en évidence la loi utilisée du matériau. La figure 7.5 représente la contrainte de la plaque d'acier au cours du temps.

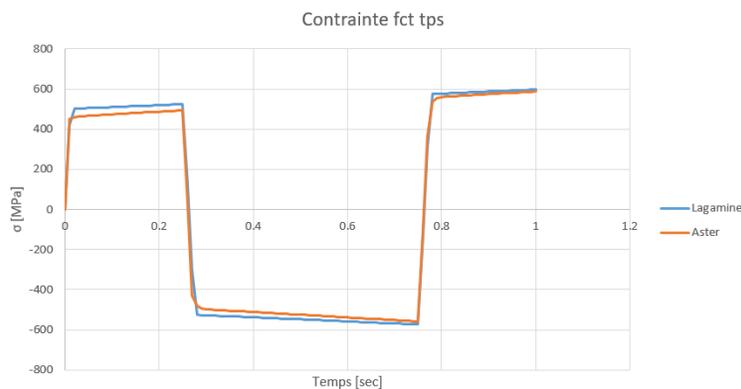


FIGURE 7.5 – Graphique de l'évolution de la contrainte dans la plaque

Sur ce graphique, on remarque quelques différences non négligeables dans la partie élasto-plastique du modèle alors que les hypothèses sur les lois du matériau utilisées sont les mêmes.

La différence est faible mais d'ores et déjà significative pour un modèle simple de traction d'une plaque.

Il nous est maintenant demandé de tracer les courbes contraintes et déplacements (figure 7.6) de ce problème.

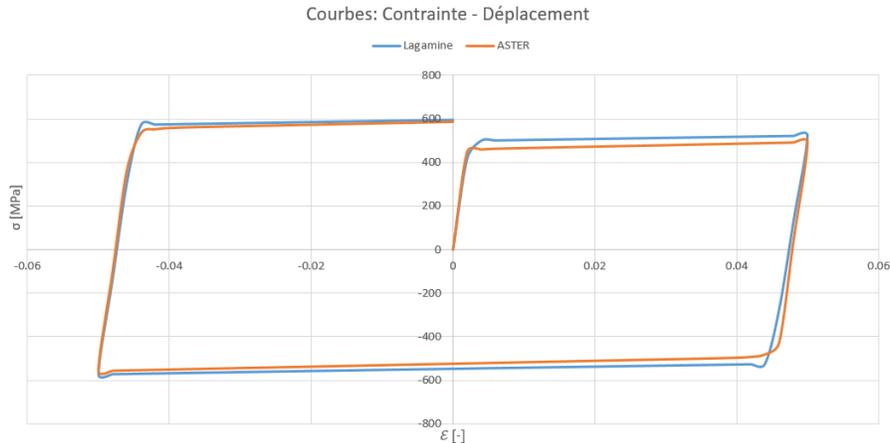


FIGURE 7.6 – Comparaison résolution par *Lagamine* et *code\_aster*

La première observation que nous pouvons apporter est que les courbes sont fort proches l'une de l'autre. Afin de vérifier mathématiquement cette observation, nous calculons l'erreur entre les deux courbes. Lorsque nous calculons l'erreur moyenne entre les deux courbes, on obtient une erreur moyenne de 26,06 MPa.

En terme de première comparaison, les résultats obtenus par le *code\_aster* nous apportent donc déjà pour un cas simple, une petite erreur par rapport au code *Lagamine*. Les méthodes numériques sont par définition des approximations du résultat réel. La question à se poser est de savoir si cette erreur est acceptable ou pas. L'erreur bien que très faible est plus que probablement due à des hypothèses différentes entre les deux codes. En effet, grâce à son interface facile d'utilisation pratique et surtout grâce à SALOME (cf. section 6.4.5), le *code\_aster* utilise des hypothèses qui ne sont pas toujours explicitement demandées. Dans le cadre d'un travail de recherche, cette fonctionnalité est très dangereuse si nous n'y faisons pas attention.

### 7.3 Résultats finaux

Après une analyse plus poussée de ce cas simple, on peut observer que l'erreur vient de l'hypothèse de l'écroutissage. Si nous travaillons avec les mêmes hypothèses (écroutissage isotrope) on observe des erreurs bien moins grandes ce qui est bien plus rassurant mais nous donne tout de même un premier signal d'attention de l'utilisation des codes éléments finis. L'étude finale est illustrée ici :

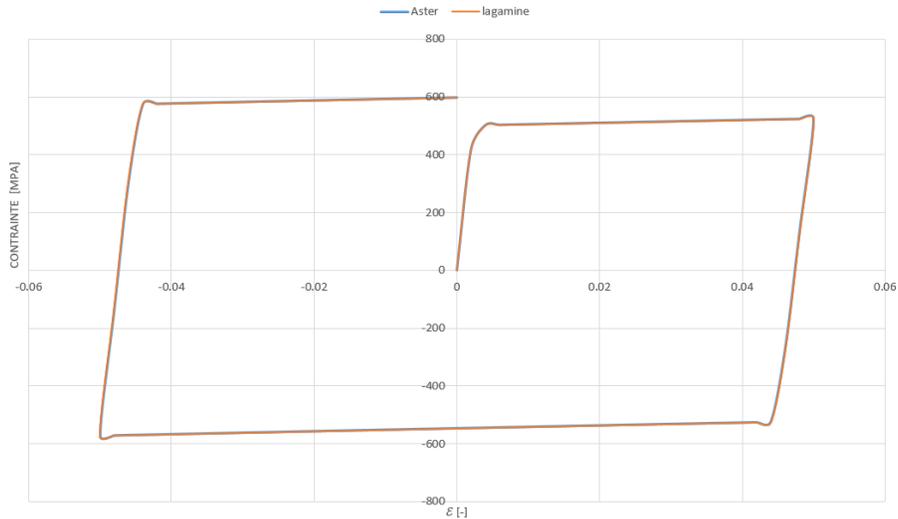


FIGURE 7.7 – Résolution finale de l'exercice introductif

### 7.4 Comparaison des interfaces

Après ce simple calcul, nous pouvons d'ores et déjà comparer les interfaces des deux méthodes de résolution. Les deux interfaces sont complètement différentes. Dans *Lagamine*, afin de résoudre un problème de base, il faut compléter minutieusement deux fichiers texte (.txt) l'un avec les données du problème et l'autre avec la stratégie de chargement à utiliser. La difficulté de ces fichiers textes est qu'ils doivent être extrêmement précis. Par exemple, un espace en trop engendre une erreur et le code ne fonctionne pas ; alors que pour le *code\_aster*, l'interface appelée SALOME est bien plus interactive et simple d'utilisation. En effet, pour encoder la géométrie de la plaque de quatre éléments sur *Lagamine*, il faut encoder noeud par noeud la géométrie et lier les différents éléments un à un. Sans mailleur tel que GMSH pour des problèmes plus importants que celui-ci, l'utilisation serait extrêmement lente et ardue.

Le *code\_aster* a aussi l'avantage d'utiliser beaucoup de listes. Par exemple, il y a une immense liste de loi de matériaux pré-encodée dans *code\_aster* ; on encode quelques propriétés et *code\_aster* complète automatiquement la loi avec des valeurs "de base". L'utilisation de telles listes est un avantage certain, elle permet de gagner du temps. Mais il faut être extrêmement prudent avec cette fonctionnalité de *code\_aster*. En effet, le risque est de se servir de cette fonctionnalité qui ajoute des hypothèses et propriétés qui n'étaient initialement pas demandées et donc de ne pas comparer les codes sous les mêmes hypothèses, ce qui conduirait

à des interprétations erronées.

En revanche, *Lagamine* possède l'avantage d'afficher automatiquement la progression dans le temps du code alors que pour le *code\_aster* ce n'est pas si simple. En effet, il est possible d'afficher l'évolution de certains paramètres mais de manière plus compliquée et manuellement<sup>1</sup>. Les figure 7.8 et 7.9 montrent les deux interfaces des codes *Lagamine* et *code\_aster*

```

STEP      1 ITER   1  FNORM/RNORM =  1.00E+00
                        UNORM/DNORM =  1.00E+00
STEP      1 ITER   2  FNORM/RNORM =  1.33E+00
NO CONVERGENCE...INCREMENT IS REDUCED

STEP      1 ITER   1  FNORM/RNORM =  1.00E+00
                        UNORM/DNORM =  1.00E+00
STEP      1 ITER   2  FNORM/RNORM =  1.02E-01
                        UNORM/DNORM =  4.01E-01
STEP      1 ITER   3  FNORM/RNORM =  4.88E-02
                        UNORM/DNORM =  9.43E-02
STEP      1 ITER   4  FNORM/RNORM =  4.89E-03
                        UNORM/DNORM =  1.82E-02
STEP      1 ITER   5  FNORM/RNORM =  1.19E-04
                        UNORM/DNORM =  4.18E-04
STEP      1 ITER   6  FNORM/RNORM =  5.18E-07
                        UNORM/DNORM =  3.70E-06
STEP      1 ITER   7  FNORM/RNORM =  5.53E-09
RESULTS SAVED ON FILE   3  DMULCUM =  5.00000000E-03
                        FMULCUM =   0.00000000
                        DELTAT  =  5.00000000E-03
                        TIMECUM =  5.00000000E-03

STEP      2 ITER   1  FNORM/RNORM =  1.58E-01
                        UNORM/DNORM =  2.61E-01
STEP      2 ITER   2  FNORM/RNORM =  6.41E-05
                        UNORM/DNORM =  9.10E-05
STEP      2 ITER   3  FNORM/RNORM =  1.50E-10
RESULTS SAVED ON FILE   3  DMULCUM =  1.00000000E-02
                        FMULCUM =   0.00000000
                        DELTAT  =  5.00000000E-03
                        TIMECUM =  1.00000000E-02

GOOD CONVERGENCE...INCREMENT IS MULTIPLIED

```

FIGURE 7.8 – Interface *Lagamine* lors du calcul

---

1. Il faut rafraîchir la page manuellement en cliquant sur *Refresh*.

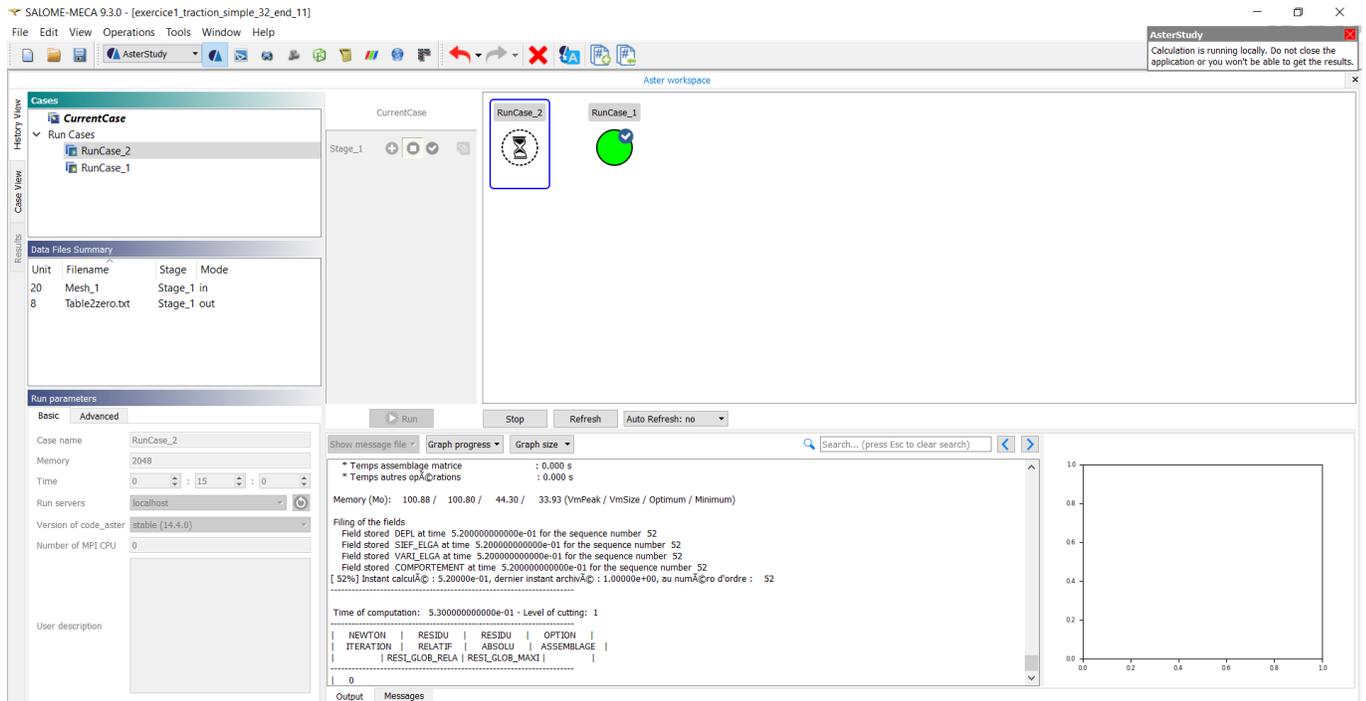


FIGURE 7.9 – Interface SALOME\_MECA lors du calcul

En première conclusion, *code\_aster* semble plus facile d'utilisation, plus aisée à prendre en main de manière plus interactive que *Lagamine* à l'aide de l'interface utilisateur graphique de SALOME. Mais qui dit plus facile, dit aussi que nous pouvons plus facilement et rapidement faire des erreurs.

Le dernier point de comparaison concerne le temps de calcul. Pour cet exercice simple, il est pour les deux codes de l'ordre de quelques secondes. Pour l'instant, il n'est pas encore possible de comparer ce point.

# Chapitre 8

## Laser cladding sur *Lagamine*

### 8.1 Laser cladding

Avant de parler de la stratégie de chargement, parlons du Laser cladding. Numériquement parlant, Le laser cladding peut être comparé à un procédé de soudage avec un apport de métal (clad). Le soudage est l'obtention d'une nouvelle continuité par fusion ou diffusion locale grâce à un apport de chaleur et de poudre métallique. Le procédé de soudage peut donc être décrit comme un passage à très haute température d'une quantité de métal pendant un bref instant. Cette élévation de la température est suivie par une phase de refroidissement par conduction et conditions limites dans la masse des pièces soudées. Pour simuler un soudage, il va falloir modéliser cet apport de métal pour que cet apport non activé n'interfère avec le modèle initial. En d'autres mots, la diffusion de la chaleur ne peut pas se faire dans le clad qui, dans la réalité, n'est pas présent. C'est pourquoi nous avons recours à la désactivation des éléments.

Le soudage met donc en jeu des gradients thermiques importants et localisés. Ce qui peut engendrer des changements de la microstructure de l'acier et ainsi changer les propriétés et lois du matériau ; c'est ce qu'on appelle la métallurgie. Ces changements n'interviennent que si la température atteint celle de début de transformation. Il existe donc des liens entre la thermique, la mécanique et la métallurgie.

## 8.2 Liens Thermique - Métallurgique - Mécanique

### Interaction Thermique-Métallurgique

Les propriétés thermo-physiques telles que la conductivité, la capacité calorifique, la diffusivité,... dépendent des phases. Inversément les différentes transformations métallurgiques s'accompagnent d'effets de chaleur latente qui modifient donc la température.

### Interaction Thermique-Mécanique

Les caractéristiques mécaniques sont fonction de la température, c'est pourquoi nous avons défini des lois de matériaux différentes sur les figures 8.15, 8.13, 8.14. En revanche, l'effet de la mécanique sur la thermique est dans ce cas négligeable car les gradients de température sont très forts, ce n'est plus le cas si nous effectuons un soudage par friction.

### Interaction Mécanique-Métallurgique

L'application d'une contrainte peut modifier la métallurgie d'un matériau en modifiant l'énergie stockée et la structure atomique du réseau. L'histoire métallurgique a également une influence sur la mécanique. Par exemple, les fontes d'aciers refroidis très rapidement n'ont pas les mêmes propriétés que les aciers qui sont refroidis à l'air libre.

En règle générale, le calcul métallurgique est fait en post-traitement. On effectue le calcul thermique (résolution de l'équation de la chaleur) sans tenir compte de la métallurgie. Une fois ce calcul fait, on regarde avec le champ de température obtenu si les températures de solidus ont été atteintes. On regarde si le matériau subit des transformations métallurgiques que l'on appliquera ensuite.

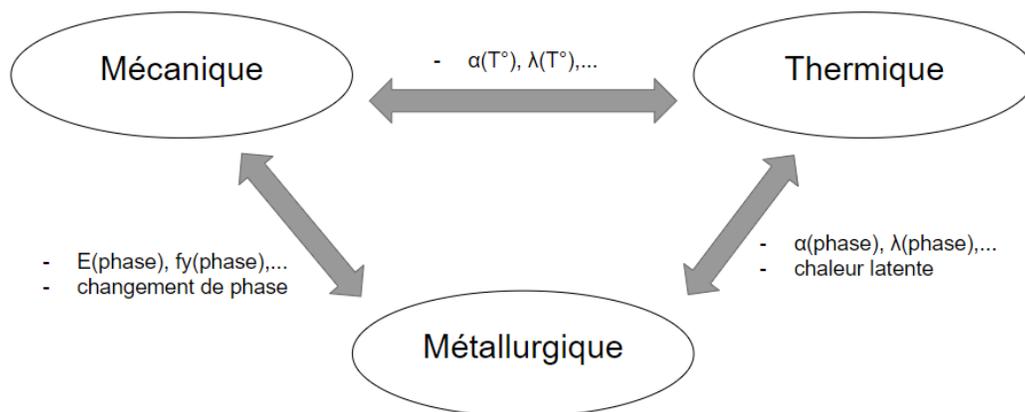


FIGURE 8.1 – Interaction thermique, mécanique et métallurgique

Mais dans le cadre de ce travail, seule la partie thermique a été prise en compte.

### 8.3 Géométrie du problème 3D

La géométrie du problème est une pièce composée d'un support cylindrique surmonté par un parallélépipède rectangle. La partie inférieure du cylindre est de l'aluminium alors que la partie supérieure est de l'acier. Les dimensions des pièces sont les suivantes :

- le cylindre de hauteur 40mm et de diamètre 100mm ;
- le parallélépipède rectangle de 40 x 40 x 27.5  $mm^3$ .

Dans la représentation en 2D, en coupant au milieu, on a une géométrie avec deux rectangles posés l'un sur l'autre comme illustré à la figure suivante (Figure 8.2).

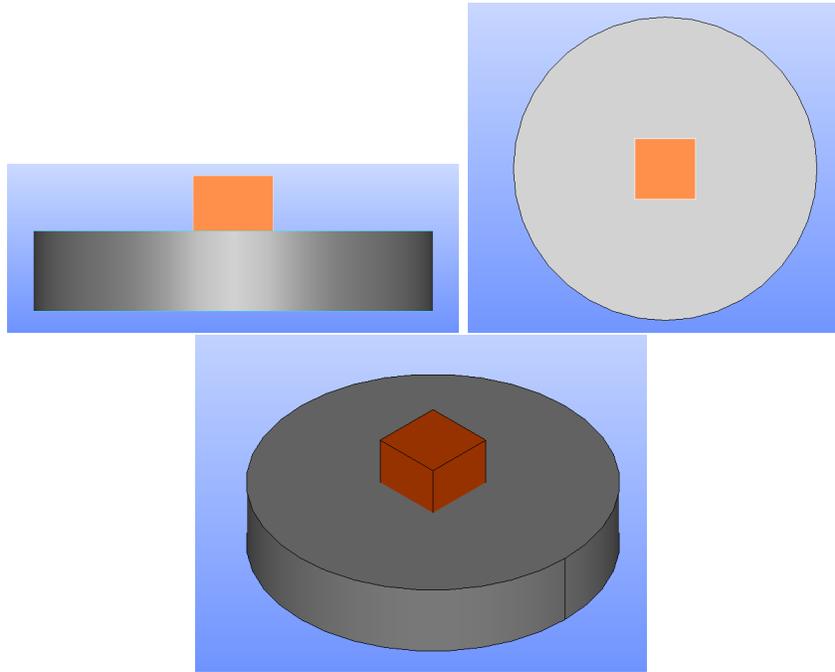


FIGURE 8.2 – Géométrie de notre problème

En toute rigueur, le procédé de soudage est strictement tridimensionnel, l'apport de chaleur et de matière est mobile. Les champs de températures et mécaniques engendrés sont donc tridimensionnels et transitoires. Il est donc préférable de réaliser une analyse transitoire tridimensionnelle.

Cependant, ce choix n'étant pas toujours possible du fait de la complexité, du temps de calcul et de la capacité mémoire requis par des calculs 3D, on a souvent recours à une modélisation 2D en simulation numérique du soudage.

### 8.4 Le substrat $42CrMo4$

Acier faiblement allié, magnétique, issu de la technologie "master-batch" et préparé à partir d'une poudre "fercarbonyle" ayant une granulométrie maximale de 6  $\mu m$ . Cette matière est spécialement conçue pour le traitement thermique. Elle est recommandée pour les applications demandant de très bonnes résistances mécaniques et ténacités tels que l'armement,

l'outillage ou les pièces de machines. [66] [67]

Le substrat sert à recevoir le clad. Le clad sera "soudé" directement sur le substrat. Tandis que le support sert à déposer le substrat. Quand un clad est terminé, il est soudé au substrat. Lors d'un nouveau clad, il faut un nouveau substrat qui sera à nouveau déposé sur le support (qui reste en place). Lors du calcul, il faut tenir compte du support car il conduit la chaleur selon ses propres propriétés.[66] [67]

## 8.5 Représentation 2D

La représentation 2D du problème est comme illustrée en figure 8.3 [18]. Le rectangle supérieur représente le clad qui sera ajouté au fur et à mesure du passage de la source de chaleur. Dans le modèle éléments finis, il est représenté par des éléments qui sont inactifs, ils n'interfèrent donc pas mais sont tout de même illustré.

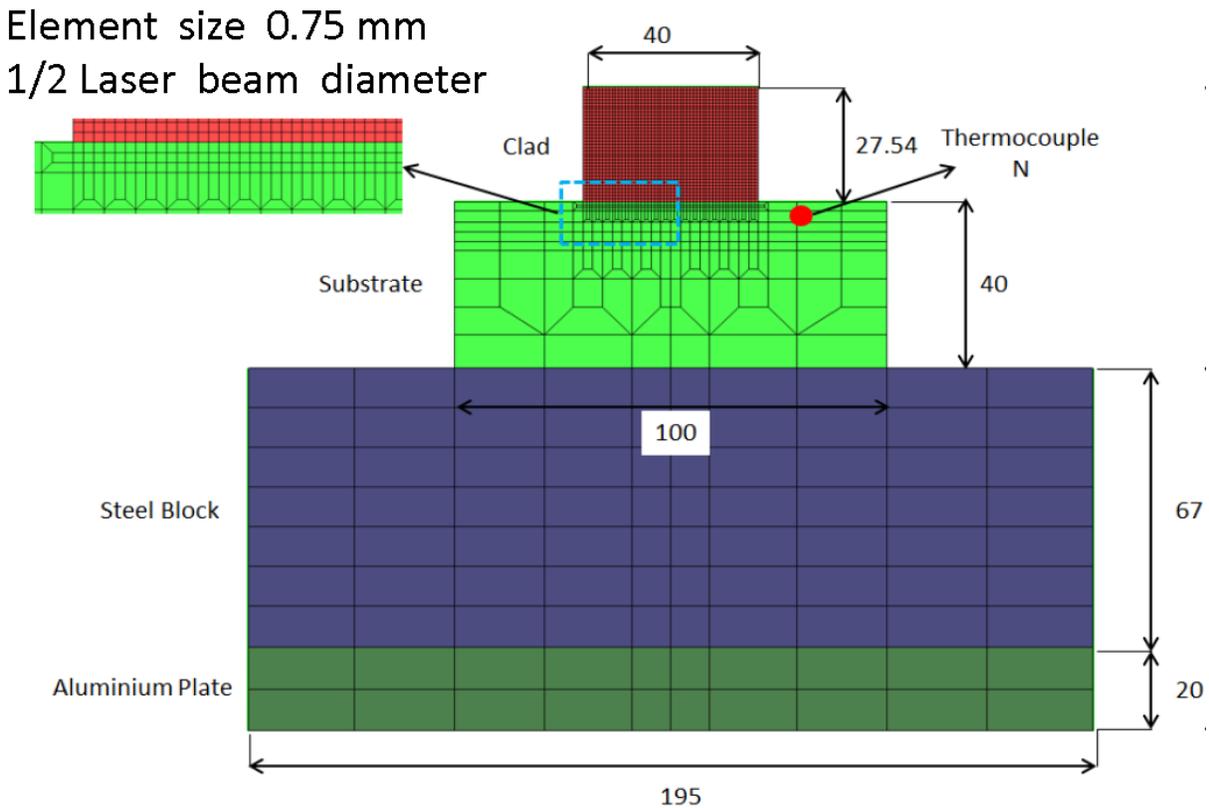


FIGURE 8.3 – Représentation 2D du problème [18]

Ce schéma a été repris de 2D FE Simulations of High Speed Steel Laser Cladding Process de R.T. Jardin, H.S. Tran, N. Hashemi, J.T. Tchuindjang, R. Carrus, L. Duchêne, A. Mertensand A.M. Habraken. [18]

## 8.6 Maillage

Comme pour n'importe quel problème d'analyse numérique, il est nécessaire de prévoir, dès l'étape de maillage, les groupes destinés à recevoir les conditions aux limites thermiques et mécaniques (trajet de la source de chaleur, surface d'échange...). Ceci est d'autant plus vrai pour le maillage thermique où le chargement (source chaleur) et les conditions aux limites (convection et rayonnement) se déplacent au fur et à mesure de la dépose des cordons.

Le maillage est donc divisé en trois groupes, ci-après :

- la zone de clad ;
- la zone du substrat ;
- la zone de support.

Ces groupes vont être décrits et illustrés ci-après :

### 8.6.1 La zone de clad

La zone de clad concerne le matériau soudé soit notre acier HSS M4. Dans la zone de clad, nous avons les différentes *layers*, c'est à dire les couches situées au-dessus du substrat. C'est la zone où le maillage est le plus fin car c'est la zone la plus délicate à gérer. Cette zone requiert un maillage fin car on y observe d'importants gradients thermiques. En effet, le maillage ne doit pas être trop grossier pour éviter les problèmes d'oscillations et il ne doit pas être trop fin pour ne pas demander un temps de calcul trop important. De plus, il faut respecter la hauteur des layers mais aussi penser aux passages du laser.

Le maillage doit être suffisamment fin autour de la source de chaleur (cordons de soudure et zone fondue) pour appréhender correctement les forts gradients thermiques et mécaniques dans cette zone.

Cette zone est représentée à la figure 8.4.

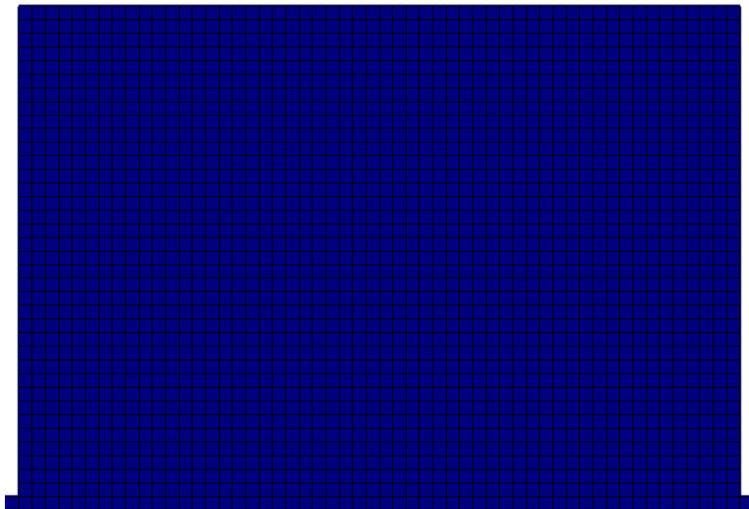


FIGURE 8.4 – Zone de clad

### 8.6.2 La zone du substrat

Le groupe physique substrat sera directement affecté par le flux de chaleur pendant le revêtement de la première couche.

Les contraintes sur la taille des éléments de ce groupe sont moins importantes, on peut se permettre d'avoir un maillage un peu moins fin. Cependant, nous allons tout de même avoir des gradients thermiques dans cette zone, il faudra donc un maillage assez fin.

Notons également que cette zone doit aussi servir à éviter les problèmes de cohérence du maillage entre la zone de clad et la zone de support. Comme expliqué en section 8.6.5.

La zone de substrat est représentée figure 8.5.

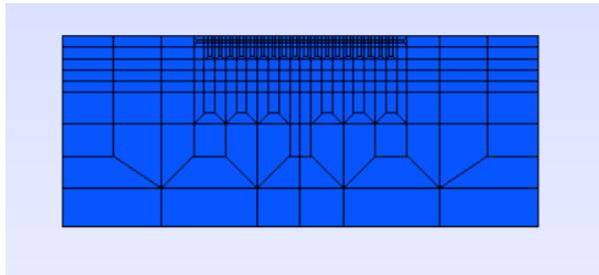


FIGURE 8.5 – Zone du substrat

### 8.6.3 La zone de support

La zone de support sert à déposer le substrat. Lors du calcul, il faut tenir compte de cette zone car ce support conduit la chaleur selon ses propres propriétés. Il est divisé en deux groupes physiques relatifs aux deux matériaux différents utilisés. Une zone en contact avec le substrat de l'acier et une zone plus éloignée de la source de chaleur : de l'aluminium. La zone plus éloignée ne percevra que de petits gradients thermiques. Ces deux zones sont représentées à la figure 8.6.

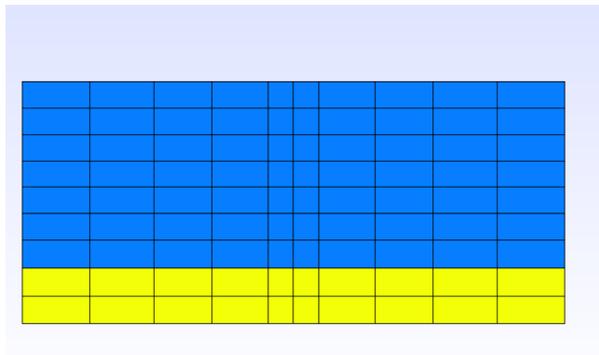


FIGURE 8.6 – Zone de support

### 8.6.4 Maillage final

Le maillage final est illustré en figure 8.7 représentant tous les noeuds.

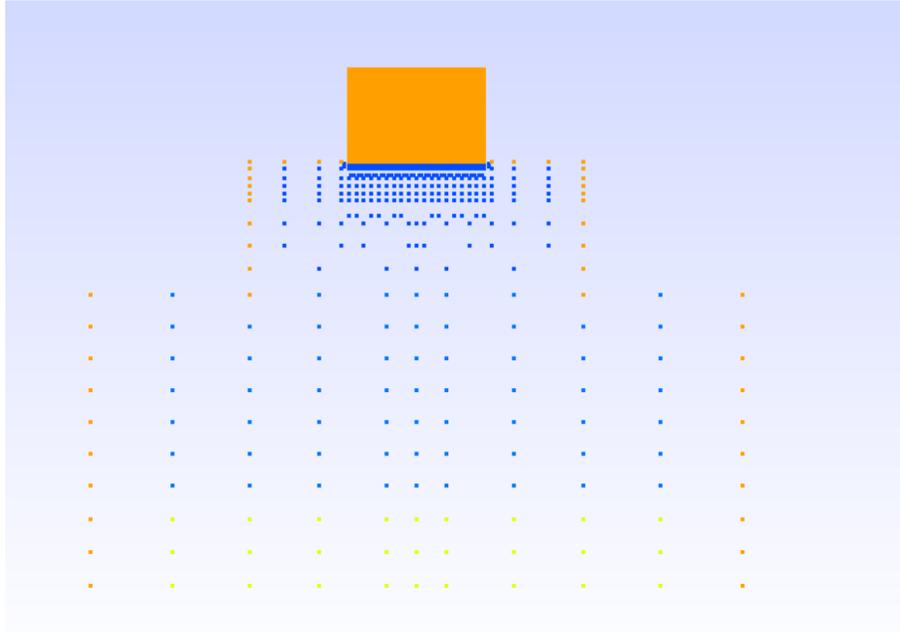


FIGURE 8.7 – Représentation des noeuds

Maintenant que nous avons placé nos noeuds, il faut choisir le type d'éléments finis utilisés. La géométrie est la même pour tous les éléments : une géométrie dite en quadrangle qui utilise quatre noeuds et est donc de l'ordre 1. La représentation de ce maillage est effectué à la figure 8.8. Ensuite, nous avons défini des éléments linéaires frontières afin d'y appliquer les conditions limites. Ils sont définis par deux noeuds.

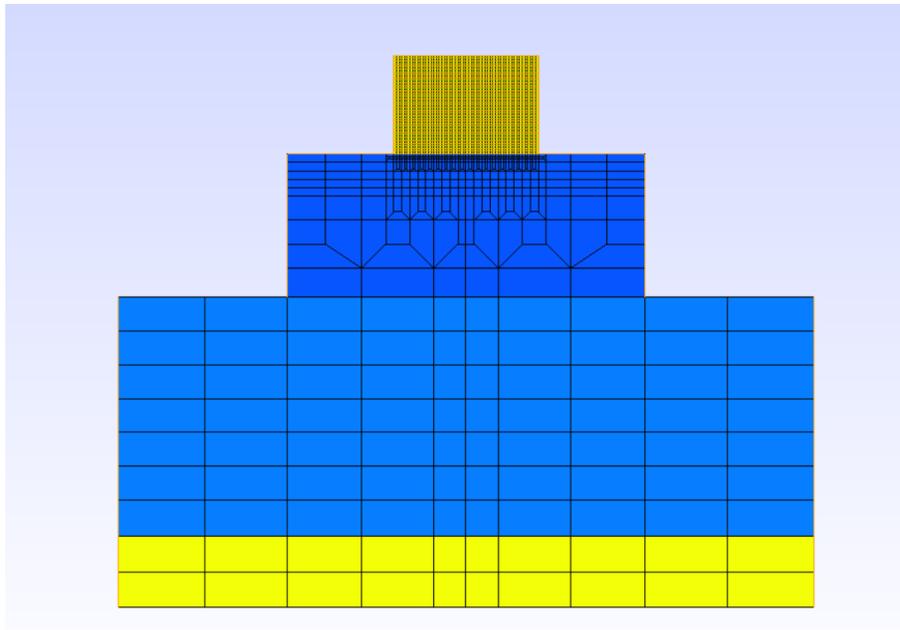


FIGURE 8.8 – Représentation des éléments

### 8.6.5 Consistance du maillage

Un maillage est dit « cohérent » lorsque pour un élément, les nœuds du maillage définissent une liaison correcte avec les nœuds du ou des éléments voisins du maillage.

Vous trouverez ci-dessous deux figures illustrant ce qu'est un maillage dit cohérent (notre maillage, figure 8.9) et ce qu'est un maillage incohérent, figure 8.10. Le maillage est incohérent au niveau des intersections entre les deux blocs, les coins des éléments arrivent sur un côté d'un élément. Alors que sur la figure 8.9 ce n'est pas le cas.[68]

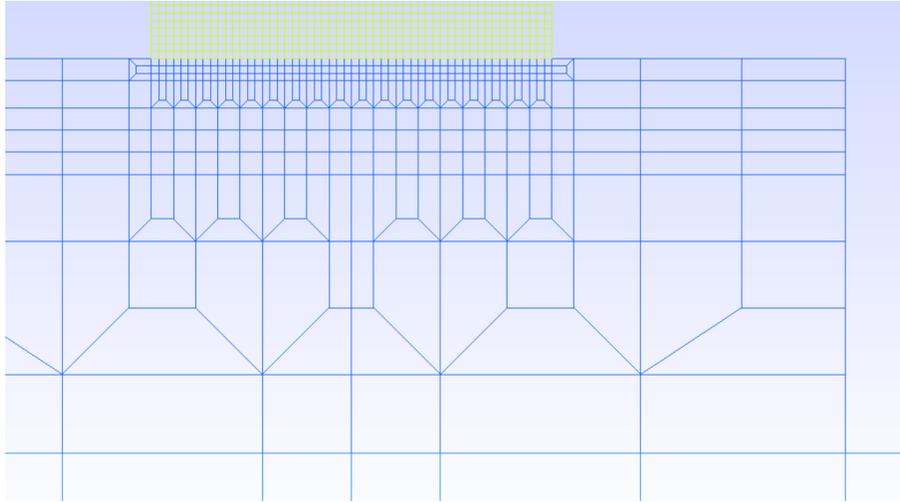


FIGURE 8.9 – Maillage consistant

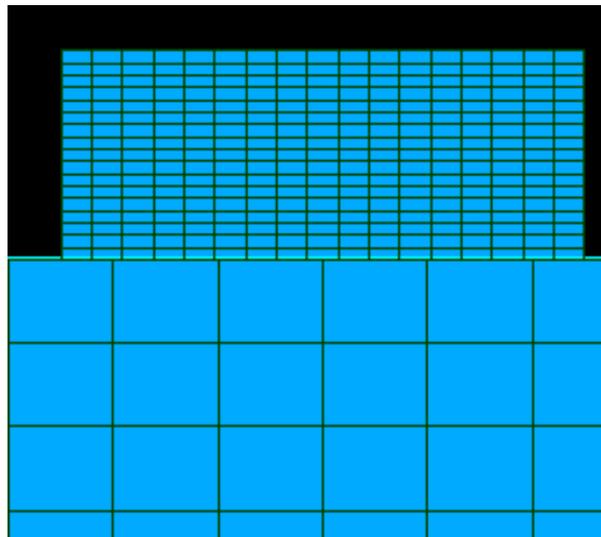


FIGURE 8.10 – Maillage inconsistant

## 8.7 Données et principales hypothèses

Le calcul à réaliser est un calcul thermique plan (2D), en effet, comme expliqué précédemment, le problème est plan. Nous sommes en état plan déformation. Le problème comprend 4540 noeuds, deux types différents d'éléments et 11 lois constitutives.

Les 4520 noeuds sont séparés en deux groupes : 2520 noeuds qui représentent la situation initiale du problème. Les 2000 autres noeuds sont des noeuds qui serviront à modéliser le soudage. En effet, pour modéliser l'opération de soudage, nous avons des éléments qui vont être activés et désactivés car le clad sera soudé directement sur le substrat. Quand un clad est terminé, il est soudé au substrat et nous avons besoin d'un nouveau substrat pour réaliser le clad suivant. Ce nouveau substrat ne doit pas influencer le clad suivant car dans la réalité il n'existe pas encore. C'est pourquoi nous devons désactiver ces éléments puis les activer au passage du laser pour éviter que l'on ne préchauffe le clad.

L'analyse métallurgique n'est pas prise en compte ; il s'agit d'une hypothèse forte pour un problème de soudage quelconque. Mais ici, nous réalisons en laser cladding sur un matériau relativement stable, ce qui permet d'utiliser cette hypothèse sans trop se pénaliser. En revanche, il s'agit d'une piste à envisager en cas d'imperfection entre les données numériquement obtenues et les données expérimentales.

Notons également que le calcul *Lagamine* est réalisé avec une renumérotation des noeuds. Cette renumérotation des noeuds ne change pas le nombre de noeuds ni le nombre d'équations mais change uniquement la numérotation des équations. Cette opération est transparente pour l'utilisateur.

NB : la méthode utilisée est la *Sloan Method*

En ce qui concerne les réactions d'appuis, tous les 2520 noeuds initiaux sont fixes dans le plan. Évidemment, le clad quant à lui n'est pas fixe. Sous l'effet de la chaleur, le matériau peut se dilater mais nous ne faisons dans un premier temps que de la thermique pure. Ce phénomène n'est donc pas pris en compte.

## 8.8 Types d'éléments

Le problème numérique utilise deux types d'éléments : les éléments CONRA et les éléments BLZ2T. Les éléments CONRA sont des éléments de convection-radiation. Les éléments BLZ2T sont des éléments plans et couplés.

### 8.8.1 Les éléments CONRA

L'élément comporte 1 noeud "vrai" et un noeud représentant l'environnement. Il modélise la convection et la radiation entre la structure et l'environnement. Il utilise la loi RACO définie précédemment.

La figure 8.11 représente les différentes configurations de l'élément CONRA selon le nombre de noeuds utilisés pour le définir. Nous utilisons pour cette étude les éléments avec trois noeuds (la figure au centre). Les côtés sont donc rectilignes et non paraboliques.

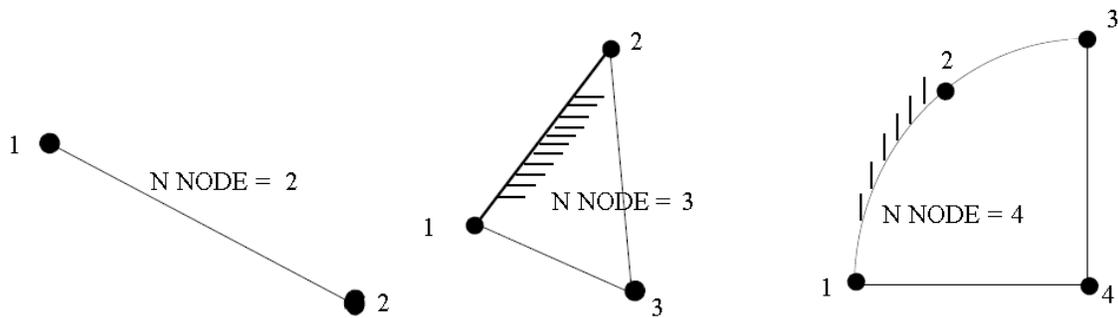


FIGURE 8.11 – Les trois types d'éléments CONRA

Ces éléments servent à réaliser Le laser cladding. Le clad est chauffé ce qui par convection et radiation (condition limite) puis conductivité thermique amène de la chaleur dans la pièce. Tous ces éléments sont les éléments représentés sur la figure 8.12 (en orange), ils sont assignés de la loi comportementale 1, une loi de type RACO dont les données sont reprises dans la table 8.1. Comme dit précédemment, ces éléments ne concernent que des éléments au bord du domaine. Rappelons que le clad est posé couche par couche. Par conséquent, dans la partie supérieure, la première couche est située au niveau le plus bas puis au fur et à mesure des passages du laser, la limite du domaine augmente.

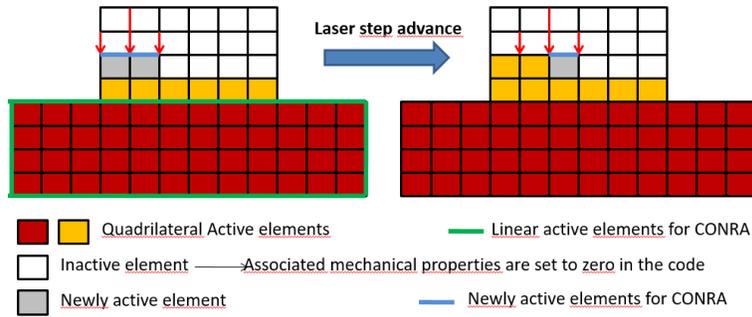


FIGURE 8.12 – Eléments CONRA du maillage [17]

### 8.8.2 Les éléments BLZ2T

Analyse thermomécanique en grandes déformations. Cet élément utilise donc des lois couplées ; il lui faut donc des définitions de matériaux mécaniques et thermiques. On dénombre quatre lois couplées sur notre domaine. Les quatre lois sont liées aux quatre zones précédemment définies dans notre maillage.

Une loi couplée est donc une loi de type EALTH pour la partie mécanique et une loi de type THNL pour la partie thermique. Nous avons donc une loi thermomécanique.

Les éléments BLZ2T n'utilisent qu'un seul point d'intégration alors que les éléments CONRA en utilisent trois.

## 8.9 Lois de comportement

Comme expliqué précédemment, il y a 11 lois constitutives différentes utilisées pour ce calcul. Ces 11 lois sont subdivisées en trois types de loi dont les paramètres vont varier. Les trois types de lois constitutives sont :

- RACO : loi thermique de convection et radiation ;
- THNL-S : loi de conduction thermique pour les solides ;
- ELATH : loi élastique avec effet thermique pour les solides (Loi couplée).

### 8.9.1 La loi RACO

La loi RACO est une loi constitutive pour la convection et la radiation. C'est une loi d'analyse thermique non linéaire des solides. Cette loi constitutive tient compte du transfert de chaleur entre le solide et le monde extérieur par convection et rayonnement. Les coefficients de convection et de rayonnement peuvent être définis comme des fonctions de la température.

La loi RACO est assignée aux lois 1, 6 et 7 soit uniquement aux éléments de la frontière.

Paramètre d'entrée de la loi :

- T température ;
- $h$  coefficient de convection à la température T ;
- $\epsilon$  émissivité, coefficient de rayonnement à la température T.

Pour la radiation, il faut définir une  $T^\circ$  avec laquelle l'échange est réalisé (voir formule d'échange par radiation).

$$q_{pi} = \frac{A_i \epsilon_i}{1 - \epsilon_i} \sigma (T_i^{*4} - T_p^4)$$

$T^*$  = température fictive prenant en compte le calcul de radiosité

Les données de cette loi sont reprises dans la table 8.1.

	T [K]	Convection $h$ [ $\frac{W}{m^2.K}$ ]	Rayonnement [ $\frac{W}{m^2.K}$ ]
Loi 1	285,15	230	$5,67.10^{-8}$
Loi 6	285,15	4	$5,9.10^{-8}$
Loi 7	285,15	4	$5,9.10^{-8}$

TABLE 8.1 – Données de la loi RACO

Notons que la valeur 230 est une valeur extrêmement élevée pour ce coefficient. La valeur de  $4 \frac{W}{m^2.K}$  est plus dans la gamme habituelle d'ordre de grandeur. En ce qui concerne l'ordre de grandeur du coefficient de rayonnement thermique, nous sommes bien dans les standards de celui-ci.

On remarque que les lois 6 et 7 ont les mêmes paramètres mais qu'elles n'ont pas le même usage. La loi 6 concerne l'acier du revêtement alors que la loi 7 concerne l'acier du clad.

### 8.9.2 La loi THNL-S

La loi THNL-S est une loi constitutive de conduction thermique. C'est une loi d'analyse thermique non linéaire des solides isotropes. Cette loi constitutive tient compte du transfert de chaleur par conduction et de l'accumulation de chaleur dans les solides. De plus, la conductivité et la capacité thermique dépendent de la température. Cette loi est utilisée pour les flux thermiques bidimensionnels ou tridimensionnels.

On utilise les formules classiques ou énergétiques. Les formules classiques utilisent la loi du flux de chaleur qui s'écoule de manière opposée au gradient de température (du plus chaud vers le plus froid).

THNL-S est assigné aux lois 2, 3, 4 et 5. Il s'agit des lois thermiques pour :

- la loi 2 pour l'aluminium ;
- la loi 3 pour l'acier qui repose sur l'aluminium ;
- la loi 5 pour le substrat ;
- la loi 4 pour le clad.

Les paramètres de cette loi sont :

- $T$  la température ;
- la conductivité thermique fonction de la température  $T$  ;
- la capacité thermique par unité de volume fonction de la température  $T$ .

La figure 8.13 représente l'évolution de la conductivité en fonction de la température.

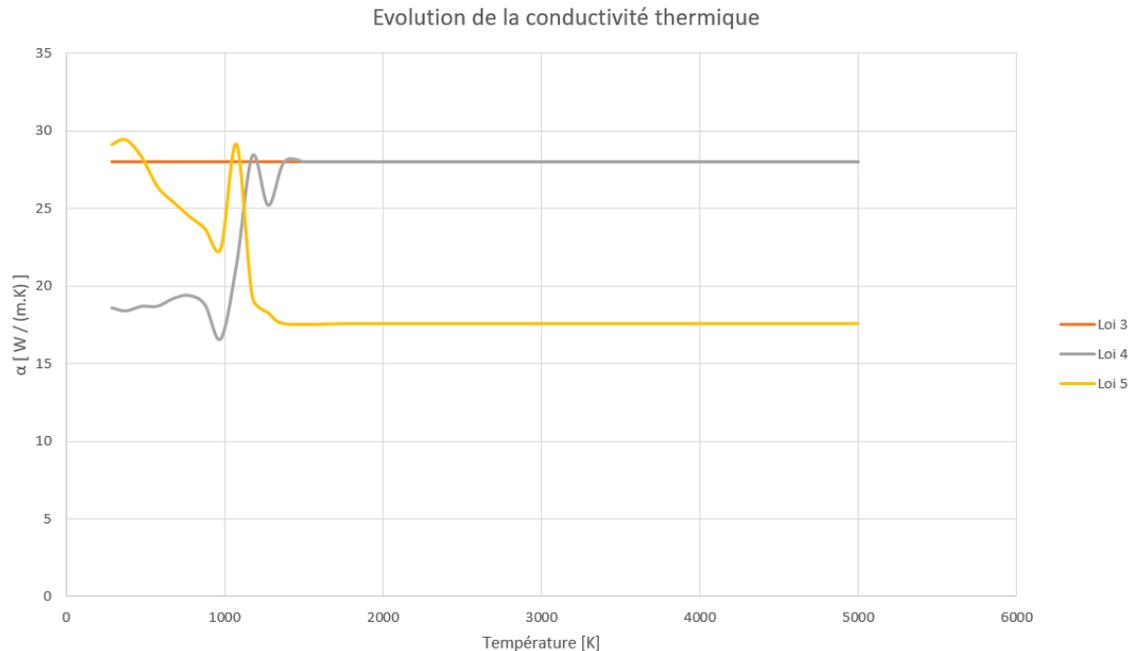


FIGURE 8.13 – Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température  $T$  (loi 3,4 et 5)

Pour une question de lisibilité, la loi de l'aluminium qui concerne une gamme de température restreinte par rapport aux autres lois (de 285 à 600 K) sera représentée sur une autre figure, la figure 8.14. Cette loi ne concerne qu'une gamme de température faible car elle sera assignée à la zone la plus éloignée de la source de chaleur et subira donc les plus petites variations thermiques.

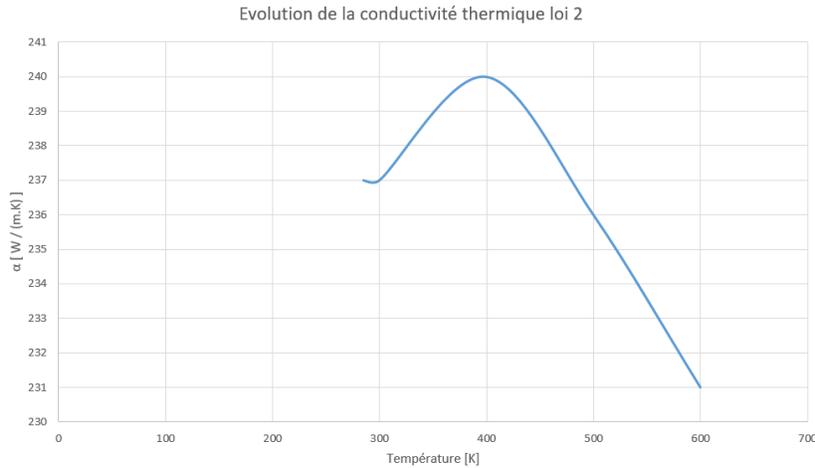


FIGURE 8.14 – Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température (loi 2)

Les valeurs du coefficient de conductivité thermique pour la loi 2 de l'ordre de  $238 \frac{W}{m.K}$  sont très importantes. En revanche, les coefficients des autres lois sont de l'ordre de  $25 \frac{W}{m.K}$ . La conductivité des aciers inoxydables est de l'ordre de  $25 \frac{W}{m.K}$  comme pour les lois 3,4 et 5 (acier, substrat et clad). En revanche, une conductivité de  $238 \frac{W}{m.K}$  s'apparente plus à la conductivité observée sur les aluminiums. (Source : Solidworks DataBase). Les matériaux possèdent donc bien des lois "standard", l'ordre de grandeur est respecté.

Enfin, la figure 8.15 représente l'évolution de la capacité thermique en fonction de la température. On remarque sur cette figure que l'aluminium (ligne bleue) concerne une gamme de température restreinte. L'ordre de grandeur est bien celui des métaux.

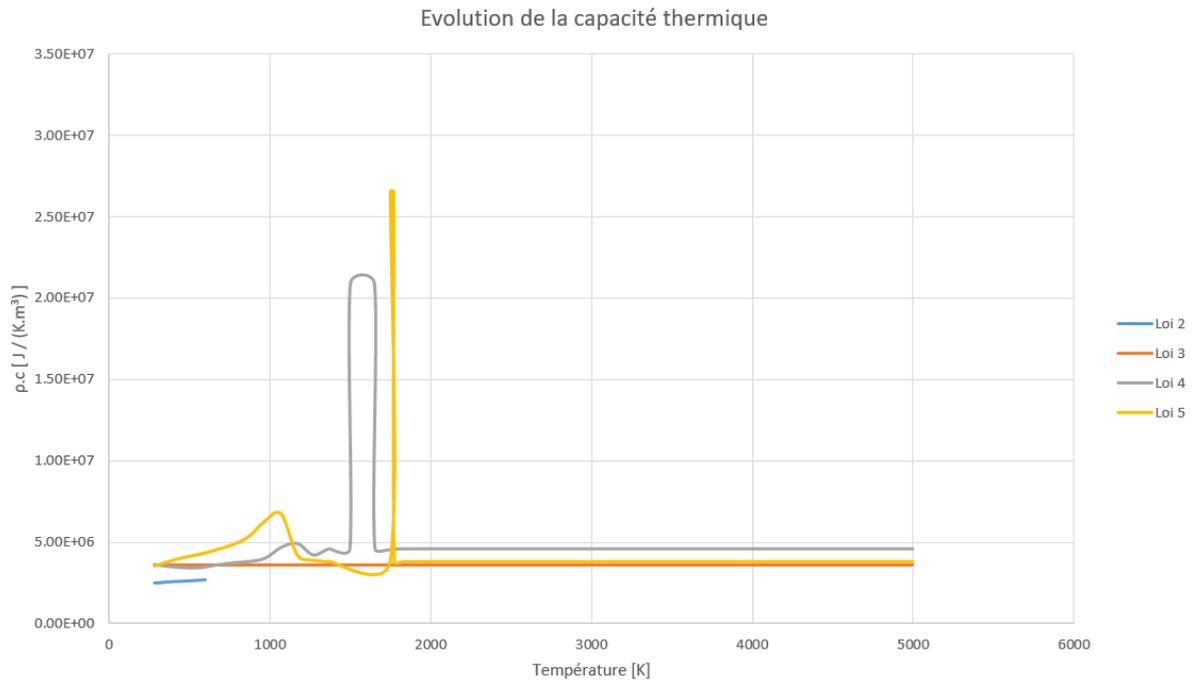


FIGURE 8.15 – Evolution de la capacité thermique par unité de volume en fonction de la température

L'évolution semble assez logique. Au niveau de la température de fusion ( $T=1800K$ ), les valeurs augmentent avant de revenir à des valeurs plus faibles. Cette augmentation de capacité est dûe au changement de phase.

### 8.9.3 La loi ELATH

La dernière loi est une loi couplée ce qui veut dire qu'elle tient compte des effets mécaniques et thermiques. Il s'agit d'une analyse couplée thermo-mécanique d'un solide élastique sous de larges déformations.

La loi ELATH est assignée aux lois 8, 9, 10 et 11.

- la loi 8 pour l'aluminium ;
- la loi 9 pour l'acier qui repose sur l'aluminium ;
- la loi 11 pour le substrat ;
- la loi 10 pour le clad.

Les paramètres de la loi sont :

- la température  $T$  ;
- le module de Young  $E$  à la température  $T$  ;
- le coefficient de poisson  $\nu$  à la température  $T$  ;
- le coefficient d'expansion thermique  $\alpha$  à la température  $T$ .

Remarque : les valeurs sont des valeurs tangentes et non nodales.  
Les paramètres des lois sont repris dans la Table 8.2.

	$T$ [K]	$E$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\nu$	$\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Loi 8	285,15	$7,0 \cdot 10^{10}$	0,33	$2,05 \cdot 10^{-5}$	2550
Loi 9	285,15	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,29	$1,1 \cdot 10^{-5}$	7700
Loi 10	285,15	$2,0 \cdot 10^{11}$	0,27	$9,5 \cdot 10^{-6}$	7524
Loi 11	285,15	$2,0 \cdot 10^{11}$	0,29	$10^{-5}$	7655

TABLE 8.2 – Données de la loi EALTH

La table 8.3 reprend ces informations sur les lois comportementales couplées.

Zones	Lois mécaniques	Lois thermiques
Aluminium (Support éloignée)	Loi 8	Loi 2
Acier (Support proche)	Loi 9	Loi 3
Substrat	Loi 11	Loi 5
Clad	Loi 10	Loi 4

TABLE 8.3 – Lois comportementales couplées

## 8.10 Conclusion sur les types de lois utilisés

Pour rappel, les quatre zones sont : la zone de clad, la zone du substrat, la zone de support avec une zone proche de la source de chaleur en acier et une zone éloignée de la source de chaleur en aluminium.

Dans la partie éloignée de la zone de support (figure 8.16), les lois utilisées sont les lois 8 pour la mécanique et deux pour la thermique. Dans l'autre zone de la zone de support (figure 8.17) les lois utilisées sont les lois 9 et 3. La zone du substrat (figure 8.18) est, elle, composée des lois 11 et 5. La zone de clad (figure 8.19) est quant à elle composée des lois 10 et 4.

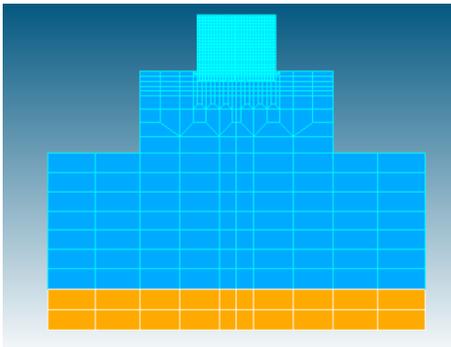


FIGURE 8.16 – Aluminium lois 8 et 2

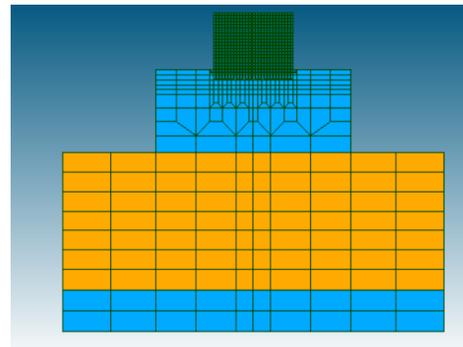


FIGURE 8.17 – Acier lois 9 et 3

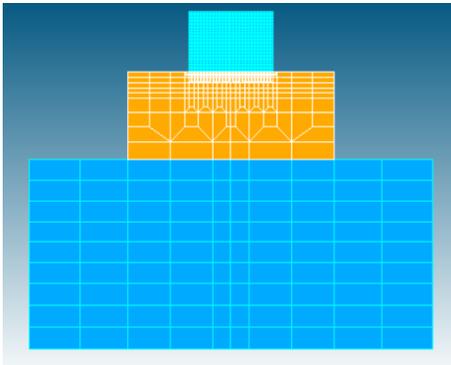


FIGURE 8.18 – Substrat lois 11 et 5

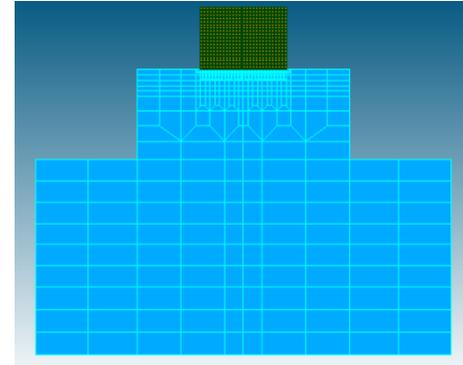


FIGURE 8.19 – Clad lois 10 et 4

## 8.11 Stratégie de chargement

Comme déjà mentionné précédemment, le chargement se fait en activant des éléments préalablement désactivés. Ceci est rendu possible dans *Lagamine* par l'utilisation de la sous-routine "Switch". Lorsque les éléments sont désactivés, leurs contraintes, propriétés thermiques et mécaniques sont nulles. L'élément désactivé n'interagit en aucune sorte avec le modèle initial. Les éléments seront activés pour simuler les nouvelles couches.

Cette méthode est similaire à la réalité où la poudre non déposée n'interagit pas avec l'acier et c'est seulement lorsqu'on dépose cette poudre chauffée par le laser qu'elle interagit. Lorsque le flux de chaleur se déplace le long de la pièce, les éléments sont activés et le flux de chaleur est appliqué sur l'élément nouvellement activé.

Dans le code *Lagamine*, les éléments sont activés légèrement avant l'application du flux de chaleur pour éviter l'application du flux sur un nœud désactivé. Afin d'améliorer la convergence du code, les éléments seront activés un step avant que le flux ne leur soit appliqué.

Cette activation de l'élément un step avant l'application de la source de chaleur a cependant un problème. Lors de l'activation des éléments à leur température initiale sur une surface chauffée, il crée un flux inversé, du substrat à la surface, qui n'est pas cohérent avec la réalité. Ce problème va engendrer une diminution de la température des layers car la chaleur va aller chauffer la zone chaude qui n'est pas physique.

Ce procédé est illustré à la figure 8.20 sur un domaine plus petit que celui étudié ici. Le principe est le même mais avec plus d'éléments.

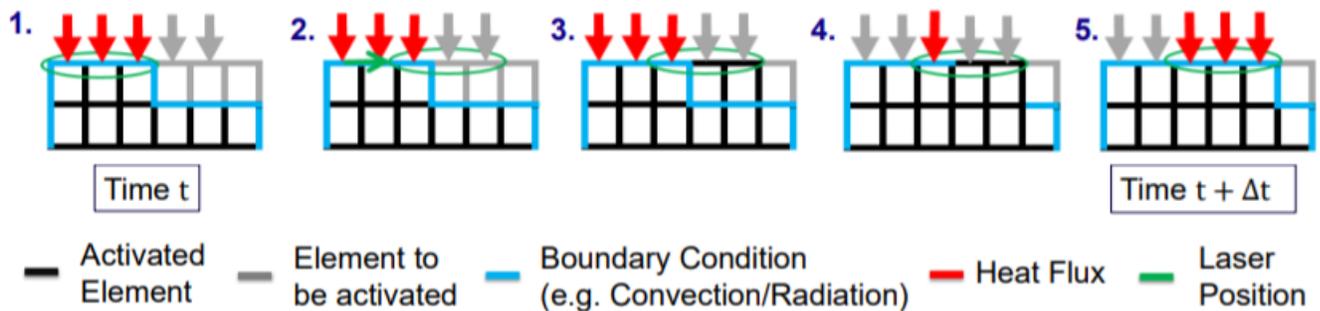


FIGURE 8.20 – Illustration du procédé d'activation des éléments [19]

Cette illustration vient du poster "Finite Element activation strategy in the numerical simulation of Additive Manufacturing Processes, C.Laruelle (cedric.laruelle@ULiege.be), R.Boman, L.Papeleux, J.-P. Ponthot, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Liège, Belgium" [19]

L'activation des éléments lorsque le flux de chaleur se déplace le long de la surface de la pièce est la façon la plus précise de représenter l'impression d'un nouveau matériau. Elle sera appelée plus tard la stratégie d'activation élément par élément.

Une alternative consiste à activer les éléments par couche. C'est-à-dire que dans le cas 2D, lorsqu'une couche de matériau a été imprimée, une deuxième couche de l'élément est activée et ainsi de suite. On parlera plus tard d'activation couche par couche stratégie. Cette méthode simplifiée présente deux avantages principaux :

- elle permet d'utiliser l'activation des éléments pour un grand nombre de couches, malgré les limitations inhérentes à *Lagamine* ;
- il permet de réduire le temps de calcul du code.

Le profil de température observé avec une stratégie d'activation couche par couche est différent de celui observé avec une stratégie élément par élément. Mais la stratégie élément par élément est bien évidemment la stratégie la plus proche de la réalité.

Une fois l'élément activé, on peut appliquer la source de chaleur aux noeuds concernés et résoudre l'équation de la chaleur afin d'observer les variations thermiques dans notre modèle suite à la réalisation d'un procédé de laser cladding.

En résumé, on peut décrire la stratégie de chargement en 5 étapes clés :

1. Connaître la configuration au moment  $t$ .
2. Calculer la position du laser au moment  $t + \Delta t$ .
3. Activer des éléments finis sur la base de la nouvelle position du laser.
4. Désactiver des conditions aux limites et le flux de chaleur sur la base de la nouvelle géométrie du maillage et de la position du laser.
5. Activer des conditions aux limites et flux de chaleur en fonction de la nouvelle géométrie du maillage et de la position du laser.

## 8.12 Modélisation de la source de chaleur

La modélisation de la source de chaleur se fait en deux étapes. Il faut déterminer :

- la valeur du flux ;
- le mouvement du laser.

La source de chaleur se déplace sur le maillage, la résolution numérique est donc transitoire.

Pour chaque pas de temps, il faut déterminer quels sont les noeuds affectés par le laser et l'intensité de celui-ci. Dans cette section, on explique la façon dont ces facteurs peuvent être modélisés numériquement pour simuler la trajectoire du laser afin de reproduire des conditions numériques aussi proches que possible de la réalité. L'accent sera mis sur les caractéristiques techniques : les incréments, la puissance, la vitesse et la forme du laser.

Il est important de noter que le taux de poudre n'est pas pertinent pour la simulation car la hauteur de la couche est considérée comme fixe. En effet, l'incrément de hauteur a déjà été utilisé pour définir la hauteur de l'élément dans la zone de clad. Ainsi, seul le flux imposé au-dessus du clad est utilisé pour modéliser l'action du laser.

Il existe de nombreuses façons de modéliser l'intensité du laser. On peut considérer un flux uniforme simple tel que Rosenthal [69], un flux triangulaire, mais aussi des modèles bien plus complexes de plus en plus proches de la réalité tels que Goldak et al. [57].

Dans notre problème, nous avons utilisé une méthode assez simple. La taille de l'élément est du même ordre de grandeur que la taille de l'élément de la source. C'est pourquoi le maillage a été affiné dans la zone de clad (cf. section 8.2). C'est ce qui est réalisé dans la plupart des simulations numériques de laser cladding.

Nous supposons que le laser fournit un flux d'énergie constant, le flux de chaleur doit à tout moment fournir la même énergie totale à la pièce. Il ne s'agit pas d'un test Varenstrain. La source est normalement exercée sur une surface, ici nous l'appliquons aux noeuds. Il faut donc répartir cette puissance surfacique en puissance nodale équivalente. Nous réalisons une discrétisation du flux de chaleur. Les flux de surface sont rapportés sur les deux noeuds adjacents. Le procédé est illustré à la figure 8.21.

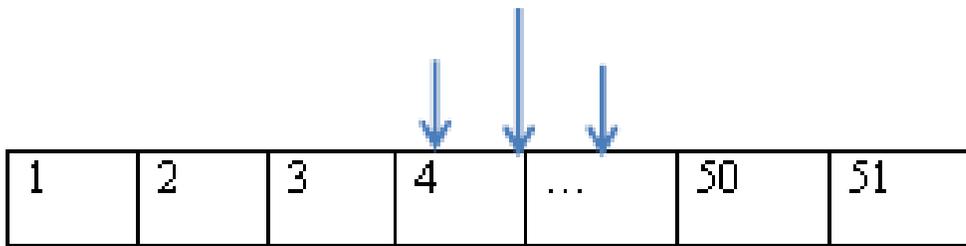


FIGURE 8.21 – Illustration du procédé de discrétisation de la puissance laser

## Puissance du laser

Dans une modélisation 3D, l'apport de chaleur par laser est modélisé par la formule suivante :

$$q_{Laser} = \beta \cdot \frac{2P}{\pi r_l^2}$$

où :

- $\beta$  est le facteur d'absorption ;
- $P$  la puissance du laser [W] ;
- $r_l$  le rayon du faisceau laser [ $\mu m$ ].

Il est important de noter que le facteur d'absorption  $\beta$  a un sens physique. En effet, seule une partie de l'énergie laser est absorbée par la pièce : ce phénomène est représenté par  $\beta$ . Il existe de nombreuses études sur ce dernier. Mais on peut retenir qu'il est fonction de quelques paramètres tels que la température sur le dessus de la pièce, la conductivité thermique, le rayonnement, la puissance nominale du laser, la valeur du rayon du faisceau ainsi que sa vitesse. Des modèles ont été formulés pour l'évaluation de ce facteur.

Alors que lors d'une analyse 2D, l'apport de chaleur par laser est calculé suivant cette formule :

$$q_{2D} = \beta_{2D} \cdot P_n$$

avec  $P_n$  qui est la puissance laser numérique ; on détermine ce facteur pour une surface  $S$  par  $P_n = 2P/S$ .

Le facteur  $\beta_{2D}$  est quant à lui une inconnue à déterminer. Ce facteur est un *fitting parameter*, un paramètre d'ajustage du modèle. Il n'est donc pas physique contrairement aux paramètres  $\beta$ . Il est calibré grâce aux expérimentations par des enregistrements de thermocouples. C'est un des prix à payer pour passer d'une représentation 3D à une représentation 2D.

La puissance nodale utilisée dans le fichier .LOA pour cette étude est de : 31158  $W/mC$  pour le noeud du centre et 15579  $W/mC$  pour les deux noeuds adjacents. Soit une distribution sur trois noeuds, ce qui correspond à une distribution du flux de façon triangulaire dont la base mesure cinq éléments.

### 8.13 Résultats fournis par le solveur *Lagamine*

Les résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel GID. Nous pouvons voir le faisceau laser qui se déplace au cours du temps (figure 8.22, 8.23, 8.24 et 8.25) et l'activation des éléments les uns après les autres.

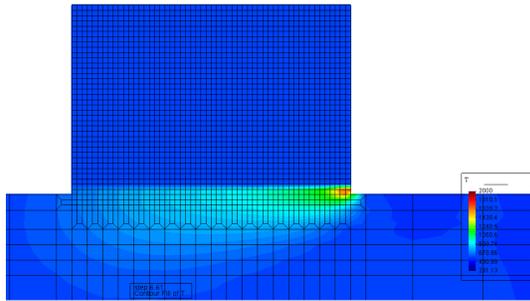


FIGURE 8.22 – Temps  $t=6.61s$  fin de la première couche

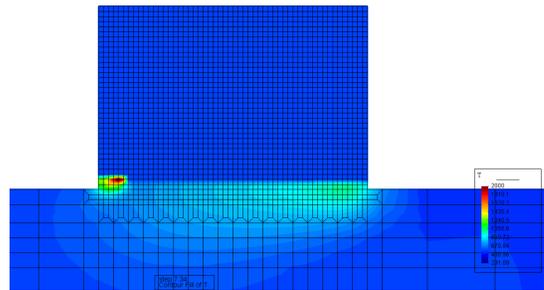


FIGURE 8.23 – Temps  $t=7.34s$  début de la deuxième couche

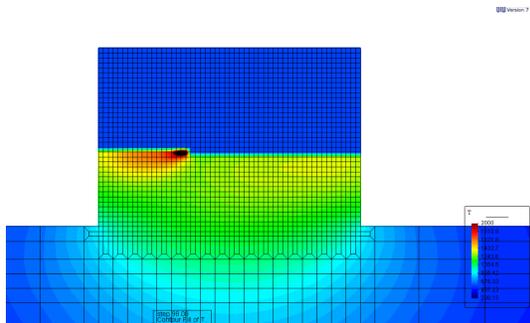


FIGURE 8.24 – Temps  $t=98.08s$  phase intermédiaire

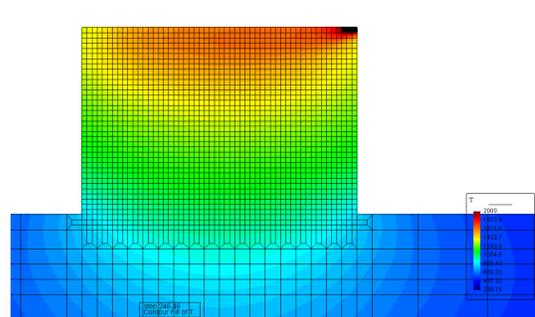


FIGURE 8.25 – Temps  $t=246.46s$  fin de l'analyse

Cette méthode d'affichage des résultats est très utile pour comprendre les différents phénomènes. De plus, nous pouvons aussi observer que le laser a une vitesse de  $6mm/s$ . Il lui faut  $6.61$  sec pour souder une couche de  $40mm$ . Lorsque l'on regarde la vitesse de diffusion de la chaleur, on observe que l'onde de chaleur pour la fin de la première couche a atteint de la matière située à  $15mm$  sous la source de chaleur. On peut donc dire que la vitesse de déplacement de laser est deux fois plus rapide que la vitesse de propagation de la chaleur. Cette conclusion est importante pour la modélisation de code Aster.

Ensuite, nous pouvons observer les différentes courbes de températures en fonction du temps pour différents noeuds du maillage. Les noeuds choisis sont représentés sur la figure 8.26.

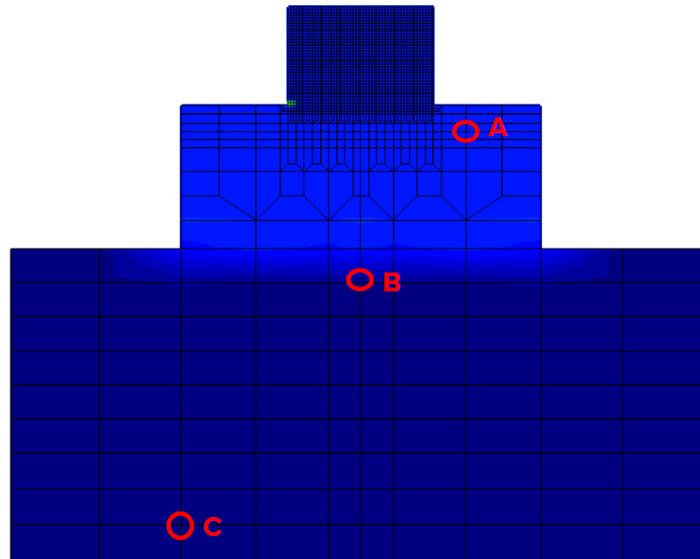


FIGURE 8.26 – Localisation des points où nous affichons l'évolution de la température

Les graphiques ci-dessous, figures 8.27, 8.28 et 8.29, représentent l'évolution de la température en fonction du temps pour différents points du maillage.

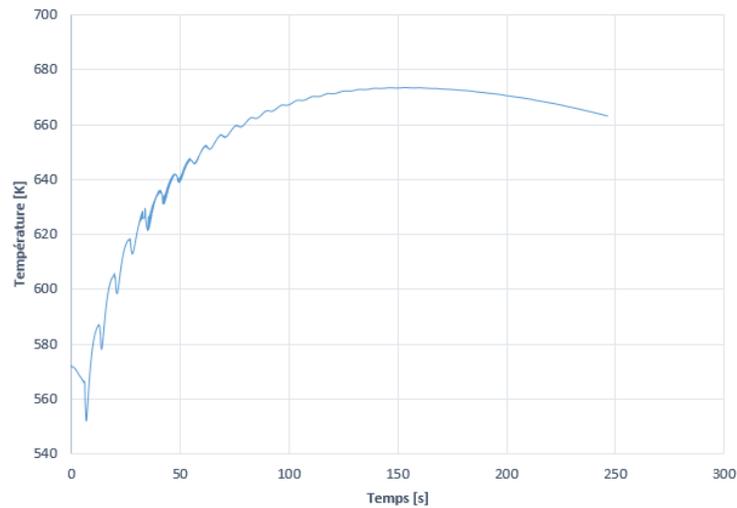


FIGURE 8.27 – Évolution de la température au niveau du point de référence A (substrat)

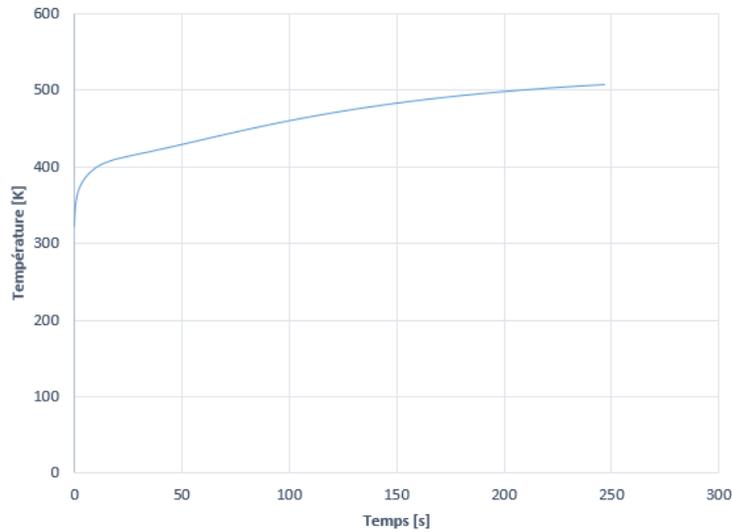


FIGURE 8.28 – Evolution de la température au niveau du point de référence B (Acier)

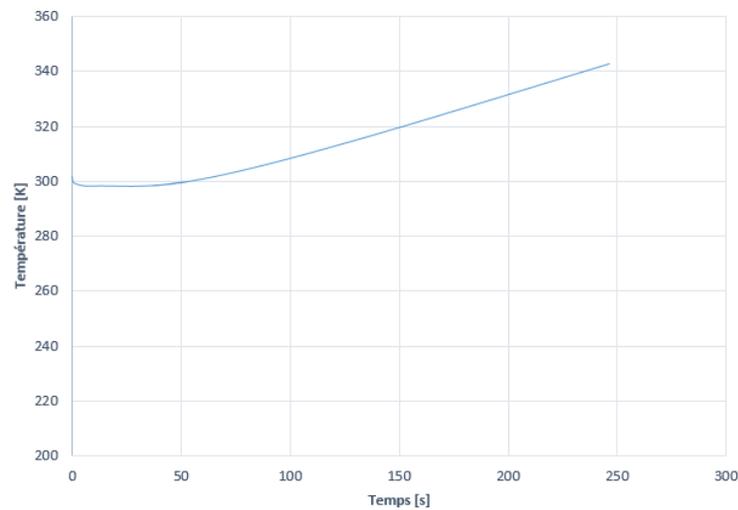


FIGURE 8.29 – Evolution de la température au niveau du point de référence C (Aluminium)

Le point A est le seul à subir des cycles de refroidissement car il est placé proche de la zone de chaleur. Lorsque la source de chaleur s'éloigne, le matériau au niveau du point A refroidit. Plus on s'éloigne de la zone de chaleur, moins la température est élevée et plus la courbe est lisse. Comme attendu au niveau du point C (aluminium), on observe les variations de températures les plus faibles mais la température continue à augmenter contrairement aux deux autres car l'onde de chaleur doit encore arriver.

Enfin, on remarque aussi que au niveau du point C on observe d'abord une phase de refroidissement puis lorsque l'onde de chaleur atteint la zone après +/- 30 secondes on observe une augmentation de la température. Pour illustrer ces observations, la figure 8.31 montre l'évolution de la température sur l'axe de symétrie de la pièce.

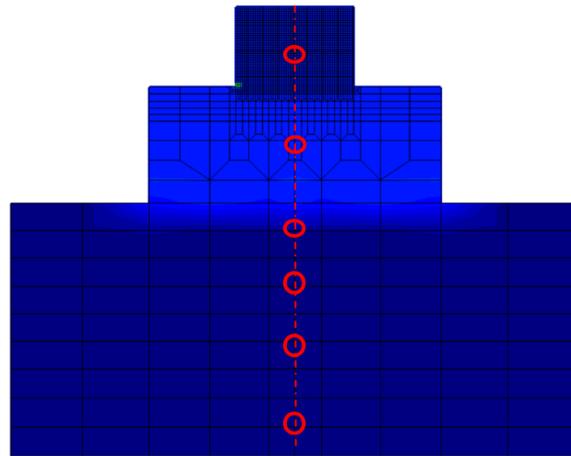


FIGURE 8.30 – Axe de symétrie et point de référence

Sur cette figure 8.31, on peut observer (courbe bleu ciel) que la désactivation puis l'activation des éléments fonctionnent parfaitement. Avant le passage du laser, aucune modification n'est observée. Ensuite, on observe des cycles de chauffe et de refroidissement amortis. Cet amortissement est dû au fait de l'éloignement de la source de chaleur qui est située sur des couches de plus en plus éloignées. En ce qui concerne la partie de matières éloignées de la source de chaleur, il n'est plus possible d'identifier ces cycles.

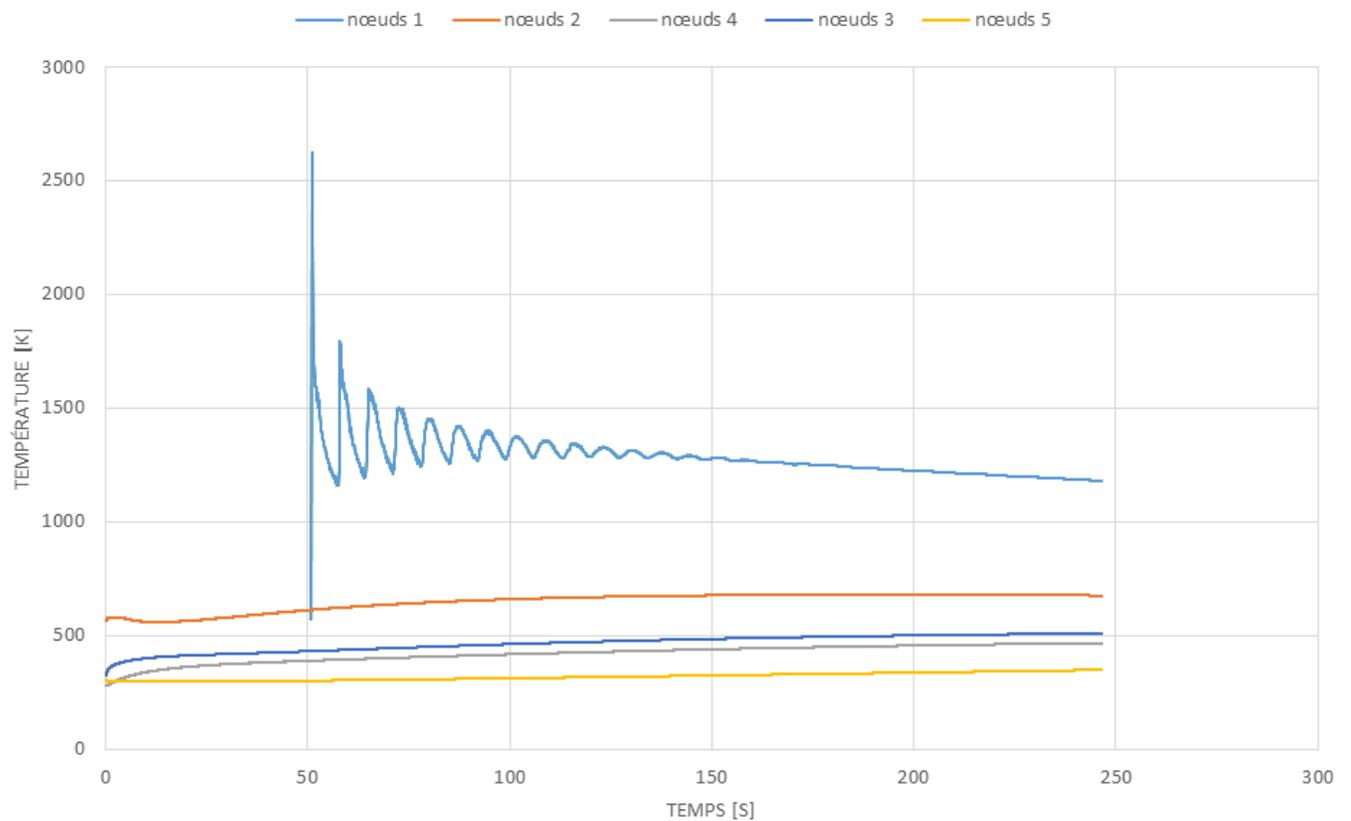


FIGURE 8.31 – Evolution de la température sur l'axe de symétrie de la pièce

Enfin, sur la figure 8.33, on peut observer l'évolution du profil des températures sur un axe horizontal comme illustré sur la figure 8.32. Les points de références sont des noeuds allant de 1 à 5 en partant de gauche en direction de la droite.

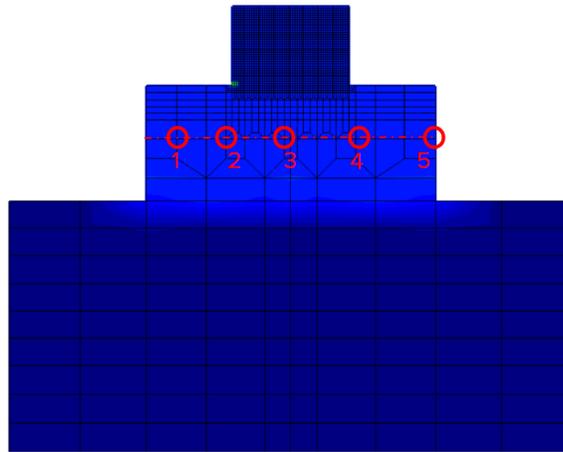


FIGURE 8.32 – Axe horizontal et points de références

Sur cette figure 8.33, on observe que les noeuds situés aux extrémités de la pièce (noeuds 1 et 5), proche de l'air extérieur, sont ceux qui atteignent les températures les plus basses. Alors que le noeuds 3, situé parfaitement au centre, est celui qui atteint la température la plus grande. C'est donc aux centres de la pièce que les températures sont les plus élevées.

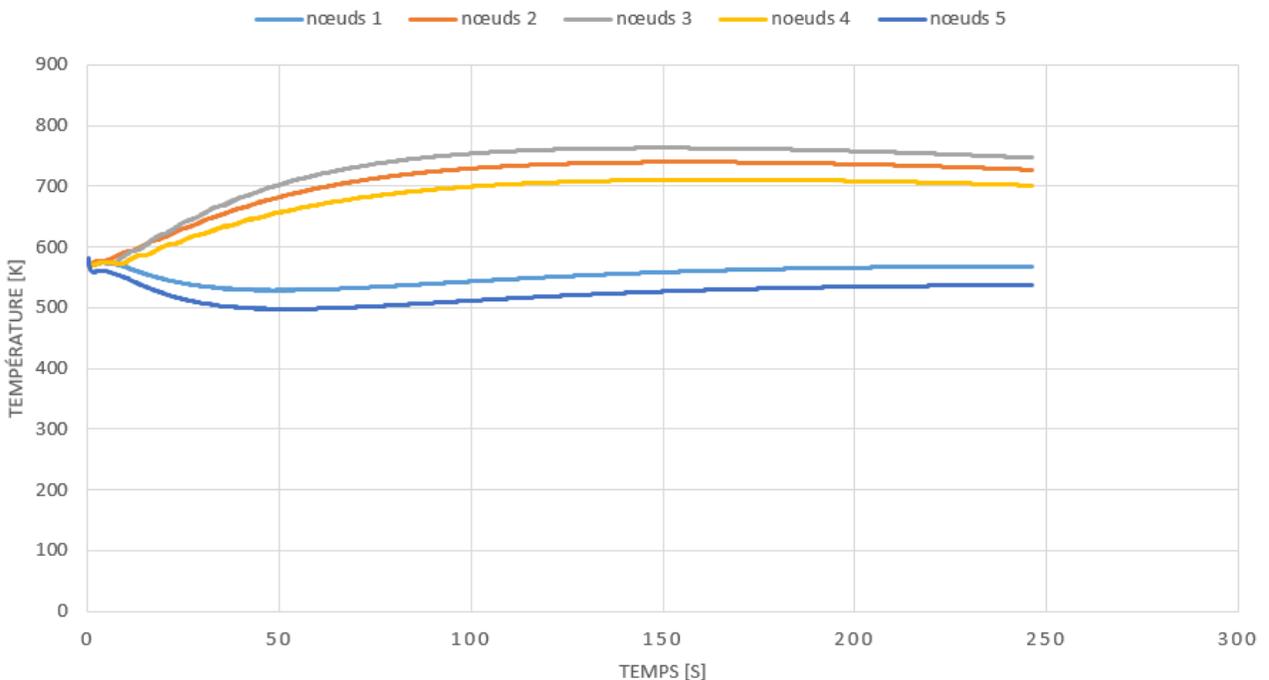


FIGURE 8.33 – Evolution de la température sur l'axe horizontal

La température au milieu de l'objet diminue plus lentement que la température à ses extrémités.

# Chapitre 9

## Laser cladding sur *code\_aster*

Avant de commencer l'explication de la modélisation du laser cladding, quelques mots sur l'installation du *code\_aster* et de son interface graphique SALOME\_MECA. Dans un premier temps, il est très important de noter que la version disponible de SALOME\_MECA sous Windows n'est pas suffisante pour réaliser des études poussées comme celles d'une modélisation d'un procédé de Laser cladding. En effet, avec SALOME\_MECA sous windows, on observe de nombreux bugs et notamment l'énorme lacune qui est de ne pas pouvoir importer un maillage d'un autre mailleur que le mailleur de GMSH<sup>1</sup>. Malgré le fait avoir cherché plusieurs semaines avec M. Luu Hoang l'équipe du Dr Van-Xuan, qui a déjà travaillé sur le *code\_aster*, nous n'avons pas trouvé de solution. Il a donc fallu passer à la version de *code\_aster* sous Linux.

Il existe de nombreuses façons de passer un ordinateur de Windows à Linux avec quelques moyens qui sont payants. Cependant, il existe la possibilité de créer gratuitement un ordinateur virtuel sur notre ordinateur avec le système d'exploitation Ubuntu qui permet d'utiliser SALOME\_MECA et donc le *code\_aster*. Les différents tutoriels disponibles sont relativement bien faits et il faut suivre scrupuleusement la procédure décrite. Mais lors de la création de la Virtual box, il est très important d'allouer un nombre de processeurs et une mémoire importante et ainsi avoir une RAM importante sans quoi le *code\_aster* ne tournera pas.

La virtual box est donc un excellent moyen de créer un ordinateur virtuel pour posséder Ubuntu mais nécessite une capacité mémoire et un ordinateur de base plus puissant que de coutume.

---

1. L'importation est possible mais il est impossible de définir des conditions limites différentes ou des lois de comportements différentes sur ce maillage.

## 9.1 Fonctionnement du *code\_ aster*

Le *code\_ aster* permet de réaliser des calculs de structures pour les phénomènes thermiques, mécaniques, thermo-mécaniques, ou encore thermo-hydro-mécaniques couplés, avec un comportement linéaire ou non linéaire, et des calculs d'acoustique interne. C'est une machine très puissante.

Le logiciel permet de modéliser différentes sources de non linéarité telles que le comportement des matériaux (plasticité, effet métallurgiques, viscoplasticité, endommagement, hydratation et séchage du béton, etc.), mais aussi les grandes déformations ou grandes rotations, le contact avec frottement et les non-linéarités géométriques.

Cependant, les études industrielles nécessitent la mise en œuvre d'outils de maillage et de visualisation graphique performants tels que le GID, qui ne fait pas partie du code. Le *code\_ aster* autorise toutefois plusieurs input et output de façon à pourvoir cette tâche.

Pour réaliser une étude, l'utilisateur doit, en général, préparer deux fichiers de données : le fichier de maillage et le fichier de commandes.

### 9.1.1 Le fichier de maillage

Ce fichier définit la description géométrique du maillage. A ce stade, le type de formulation des éléments finis utilisés et les phénomènes physiques à modéliser ne sont pas encore définis. Certaines études peuvent conduire à utiliser plusieurs fichiers de maillage ; l'une des méthodes de modélisation du soudage utilise cette propriété.

Ce fichier de maillage est produit par GMSH. Grâce à l'application en pré-processeur de SALOME, il peut être légèrement modifié. On peut aussi utiliser d'autres mailleurs pour créer ce fichier maillage. Le maillage peut être calculé grâce aux utilitaires de conversion de ces mailleurs : IDEAS, le mailleur GIBI de CASTEM 2000 et le mailleur GMSH.

Les informations que doit contenir ce fichier sont :

- les nœuds : points définis par un nom et par leurs coordonnées cartésiennes dans l'espace 2D ;
- les mailles : figures topologiques planes ou volumiques (point, segment, triangle, quadrangle, tétraèdre ...) sur lesquelles pourront s'appliquer différents types d'éléments finis, les conditions aux limites et le chargement.

Il faut ensuite, pour réaliser le calcul, que l'utilisateur définisse les entités : groupes de nœuds, groupes de mailles. Toutes les entités géométriques manipulées (nœuds, mailles, groupes de nœuds, groupes de mailles) sont utilisables à tout moment par leur nom.

### 9.1.2 Le fichier de commandes

Le fichier de commande permet quant à lui de :

- lire et éventuellement enrichir les données du fichier de maillage ;
- affecter les données de modélisation sur les entités du maillage ;
- enchaîner différentes opérations de traitement : calculs, post-traitements spécifiques ;
- éditer les résultats sur différents fichiers.

Du point de vue informatique, ce fichier contrairement au fichier de maillage *.med* est un fichier ASCII. La syntaxe du fichier est liée au langage Python.

Il est indispensable de créer explicitement à ce stade les mailles situées sur les frontières d'application des chargements et des conditions aux limites.

### 9.1.3 Architecture du code à fournir

Une étude sous *code\_aster* se fait en général en 4 grandes étapes : la préparation du travail, qui se termine après la lecture du maillage, la modélisation au cours de laquelle sont définies et affectées toutes les propriétés des éléments finis et des matériaux, les conditions aux limites et les chargements. Le calcul peut alors être réalisé par l'exécution de méthodes de résolutions globales. La figure 9.1 reprend un exemple très simple de fichier qui illustre l'architecture du code.

```

mail = LIRE_MALLAGE ( )

mod1 = AFFE_MODELE(MALLAGE = mail,
                  AFPE=_F(TOUT='OUI',
                        PHENOMENE='MECANIQUE',
                        MODELISATION='AXIS'))

f_y = DEFI_FONCTION ( NOM_PARA = 'Y'
                    VALE =_F ( 0., 20000.,
                               4., 0. )
                    )

charg = AFFE_CHAR_MECA_F ( MODELE = mod1
                          PRES_REP =_F ( GROUP_MA = ('lfa', 'ldf'),
                                           PRES = f_y ) )

.....
res1 = MECA_STATIQUE( MODELE=mod1,
                     .....
                     EXCIT=_F(CHARGE = charg),
                     ....)

res1 = CALC_CHAMP ( reuse=res1, RESULTAT=res1,
                  MODELE=mod1,
                  CONTRAINTE=('SIGM_ELNO'),
                  DEFORMATION=('EPSI_ELNO'),);

```

FIGURE 9.1 – Illustration de l'architecture d'un fichier de commande

## 9.2 Maillage et lois comportementales

Le maillage ainsi que les lois matériaux utilisées sont exactement les mêmes pour *code\_aster* et *Lagamine*<sup>2</sup>. Nous avons le même nombre de noeuds, le même nombre de paramètres, etc. pour définir une loi non linéaire.

Cependant, le maillage utilisé par *Lagamine* n'est pas au même format que celui du *code\_aster*. On ne peut donc pas simplement utiliser le même maillage. La procédure utilisée pour récupérer le même maillage dans *code\_aster* est la suivante : la première opération est d'ouvrir le fichier que le *prepro* nous renvoie intitulé *exemple\_de\_fichier\_gid.msh* dans un éditeur de texte comme TextPad, supprimer les lignes et colonnes inutiles. Ensuite, écrire les informations nécessaires au format .MSH (comme \$MeshFormat,\$Nodes, \$Elements,...). Il faut aussi assigner une entité physique et géométrique aux éléments et enfin ordonner correctement les noeuds pour former les éléments de forme quadrilatère souhaitée en respectant l'ordre demandé par GMSH. Cette procédure a été exécutée grâce à la combinaison entre un logiciel Matlab développé dans le cadre de ce TFE mais aussi l'utilisation de l'éditeur de texte TextPad. M. Geuzaine a aidé à réaliser cette étape.

En ce qui concerne la définition des lois, c'est beaucoup plus facile sur le *code\_aster* grâce à l'interface SALOME\_MECA. Il est également possible de faire énormément de choses comme d'ajouter de l'écrouissage, de l'endommagement, et beaucoup d'autres options bien plus facilement que sur *Lagamine*.

Comme pour *Lagamine*, le modèle est un modèle thermique plan, ce qui implique la résolution de l'équation de la chaleur en tout point

$$\rho C \dot{T} - \lambda \Delta T - s = 0$$

dont les paramètres ont été définis à la section 6.2. Rappelons également que l'équation est non linéaire de part les conditions limites et les paramètres des matériaux fonction de la température.

## 9.3 Conditions limites

Comme pour l'étude sur *Lagamine*, les conditions limites thermiques sont modélisées par des échanges convectifs et radiatifs et par l'équation ci-après.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{ext}) + \epsilon \sigma (T^4 - T_{ext}^4)$$

dont les paramètres ont déjà été définis.

Cependant, nous pouvons ajouter que l'influence de ces deux phénomènes est relativement faible en comparaison à l'influence de la conductivité thermique du matériau suite à l'apport

---

2. A une exception près, la loi du clad a été modifiée pour la modélisation de l'activation et la désactivation des éléments.

de chaleur du laser. Néanmoins, à proximité de la source, le rayonnement est relativement important.

## 9.4 Source de chaleur

En ce qui concerne la modélisation de la source de chaleur, le *code\_aster* propose deux méthodes possibles. La première consiste à appliquer des températures à la matière que l'on dépose. La seconde méthode consiste à appliquer un flux de chaleur.

C'est cette seconde méthode qui a été privilégiée. D'une part, parce que c'est ce qui a été fait dans le code *Lagamine* (cf. section 8.12); d'autre part, cette méthode est préférable puisque nous connaissons les paramètres de puissance du laser. Cette puissance sera répartie sur le maillage exactement de la même manière que pour le code *Lagamine*.

Cependant, il y a tout de même une différence entre *Lagamine* et *code\_aster* concernant le flux de chaleur. Le flux de chaleur dans *Lagamine* est appliqué aux noeuds alors que dans *code\_aster* il est appliqué sur un bord. Il ne s'agit que d'une différence d'encodage des données. En effet, le flux nodal de *Lagamine* est, lors du calcul, distribué sur le bord. Le plus important est que la somme des flux nodaux donnent l'énergie totale apportée par le laser et il faut appliquer cette même énergie dans le code *code\_aster*, c'est ce qui est fait.

La source de chaleur suivra la même stratégie de chargement que celle décrite pour *Lagamine*. Ce flux sera constant en puissance mais fonction de l'espace et du temps. C'est une condition de Neumann.

$$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = f(t, x)$$

## 9.5 Gestion de l'ajout de matière [2]

L'ajout de matière est la partie la plus compliquée à modéliser du laser cladding. La figure 9.2<sup>3</sup> illustre la modélisation à effectuer pour représenter une soudure entre deux pièces. On peut appliquer la même méthodologie lorsqu'on simule la dépose d'un revêtement sur une pièce.

En réalité, pour obtenir la pièce AB soudée à partir des pièces A et B, il faut que le soudeur apporte le métal d'apport ainsi que la source de chaleur et qu'il progresse couche par couche.

Lors de la représentation numérique, on représente toutes les passes dans le modèle initial et on viendra ensuite les activer.

Il est important de rappeler que Le laser cladding n'est pas un procédé de fusion sur lit de poudre. En effet, comme expliqué sur la figure 3.1, Le laser cladding est un procédé de

---

3. Cette illustration a été reprise et traduite de [2].

fabrication par projection de poudre donc contrairement aux autres AM, c'est une erreur d'activer les éléments passe par passe car le métal d'apport ne peut être préchauffé par le biais de la soudure adjacente puisque dans la réalité il n'est pas présent. Cependant, comme la procédure pour activer les éléments manuellement est très lente, c'est ce qui a été fait dans ce travail.

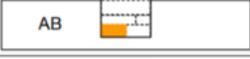
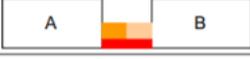
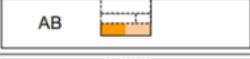
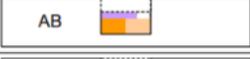
Réalité		Représentation numérique	
	Soudage		
	Source de chaleur + métal d'apport		
	Pièces A et B à souder		Pièces A et B à souder
	1ere passe		
	2e passe		Acivation passe 1
	3e passe		Acivation passe 2
	4e passe		Acivation passe 3
	5e passe		Acivation passe 4
	6e passe, pièce AB soudée		Acivation passe 5

FIGURE 9.2 – Illustration visuelle du procédé de soudage réalité vs modélisation [2]

Le *code\_aster* possède 3 méthodes [2] de simulation thermique transitoire avec désactivation du métal non encore déposé. Ces 3 techniques sont :

- par affectation d'une conductivité quasi-nulle ;
- par des modèles thermiques emboîtés ;
- par dédoublement des noeuds et recollement des noeuds à l'interface.

## Première méthode

La première méthode consiste à ne considérer qu'un seul modèle contenant toutes les passes et à désactiver artificiellement en imposant aux cordons, non encore déposés, une conductivité thermique nulle (en pratique pour éviter des problèmes de discontinuité et de convergence, on impose une conductivité très faible).

C'est la méthode qui a dans un premier temps été privilégiée car elle est plus rapide, plus facile à modéliser et donne de bons résultats.

Pour activer la conductivité thermique nulle, il existe deux possibilités :

- imposer une loi comportementale en fonction du temps ;
- imposer une loi comportementale en fonction de la température.

La première solution est difficile à mettre en oeuvre car il faut définir une loi pour chaque élément du maillage, ceci doit être réalisé à l'aide d'une ou plusieurs routines Python. La deuxième possibilité consiste à imposer une loi comportementale liée à la température et à la température initiale du domaine, on impose une conductivité thermique de  $10^{-5}W/(K.m)$ . Tant que la source de chaleur n'arrive pas sur cet élément, la température n'évolue que très peu grâce à la conductivité extrêmement faible et la conductivité thermique reste donc très faible. Une fois que la source de chaleur arrive sur l'élément, la température augmente à cause de la puissance de la source et l'élément s'active alors automatiquement avec une conductivité thermique non nulle et propre à ce matériau. La gamme de température reste loin de la température initiale et donc cette technique permet d'activer les couches élément par élément comme le demande le procédé de laser cladding.

La figure 9.3 montre l'application de cette méthode sur notre problème. La conductivité est nulle pour la loi 4 qui, je le rappelle, représente le clad. Ensuite, elle reprend les valeurs habituelles et physiques. La transition doit être la plus rapide possible. La transition ne doit pas être trop brusque sans quoi le code est difficile à faire converger.

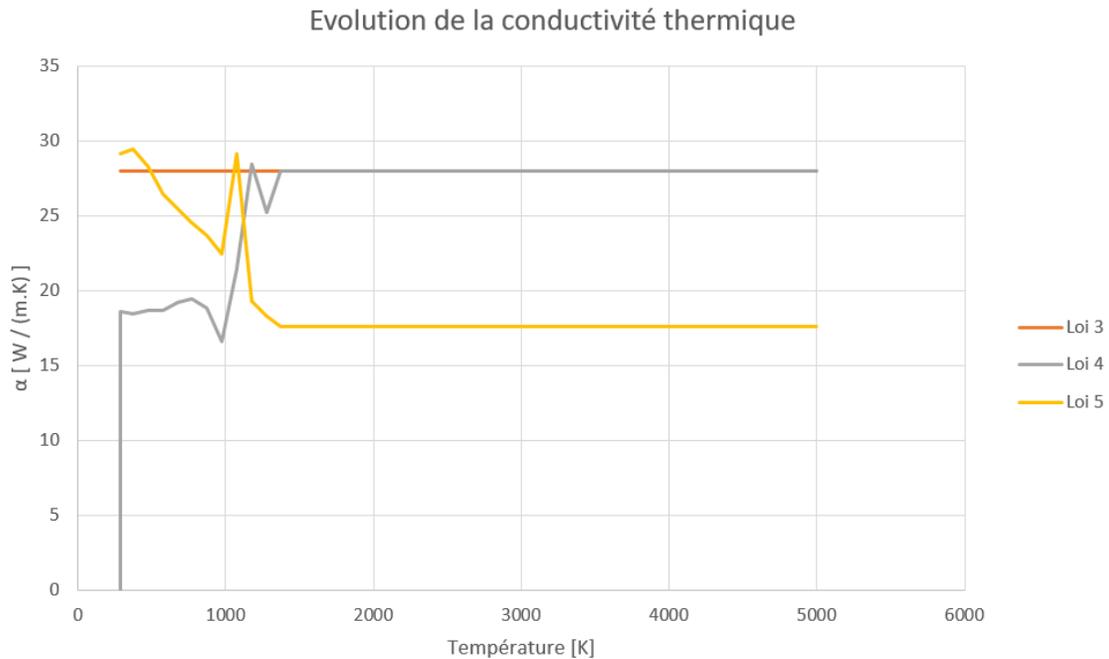


FIGURE 9.3 – Exemple de loi utilisée pour la phase 1

## Deuxième méthode

La deuxième méthode consiste à emboîter les modèles thermiques : un maillage initial de tous les cordons est utilisé. On va ensuite affecter le modèle thermique sur les couches déjà déposées. Les cordons non encore déposés ne sont donc pas inclus dans le modèle.

Il est donc nécessaire d'avoir autant de modèles thermiques qu'il y a de couches. Les différents modèles sont emboîtés les uns dans les autres. Le modèle thermique N contient les passes de 1 à N et le modèle thermique N+1 contient les passes de 1 à N+1.

Cette méthode est dite plus propre que la précédente car les éléments non déposés ne perturbent pas le calcul de la passe en cours. En effet, ils ne font pas partie du modèle.

Cette méthode est illustrée sur la figure 9.4 sur le cas d'un maillage très simple avec 3 couches.

En revanche, il y a un problème lors de l'enchaînement des calculs thermiques, les champs de température du modèle N n'étant pas définis en tous noeuds du modèle correspondant à la passe suivante N+1 . Il faut donc effectuer un prolongement des champs calculés d'un modèle à l'autre. Toutefois, le *code\_aster* permet d'effectuer cette opération avec quelques manipulations.

Mais cette technique pose plusieurs problèmes. D'une part, le modèle effectué dans *Lagamine* est implémenté selon une méthode élément par élément et non couche par couche, or, comme expliqué précédemment c'est incorrect de travailler couche par couche pour un procédé de laser cladding ; d'autre part, pour chaque couche, nous devons recharger un nouveau maillage, redéfinir les éléments, les lois de comportements, les conditions limites, etc. Cela ne prend pas beaucoup de temps de mise en oeuvre mais énormément de temps de calcul.

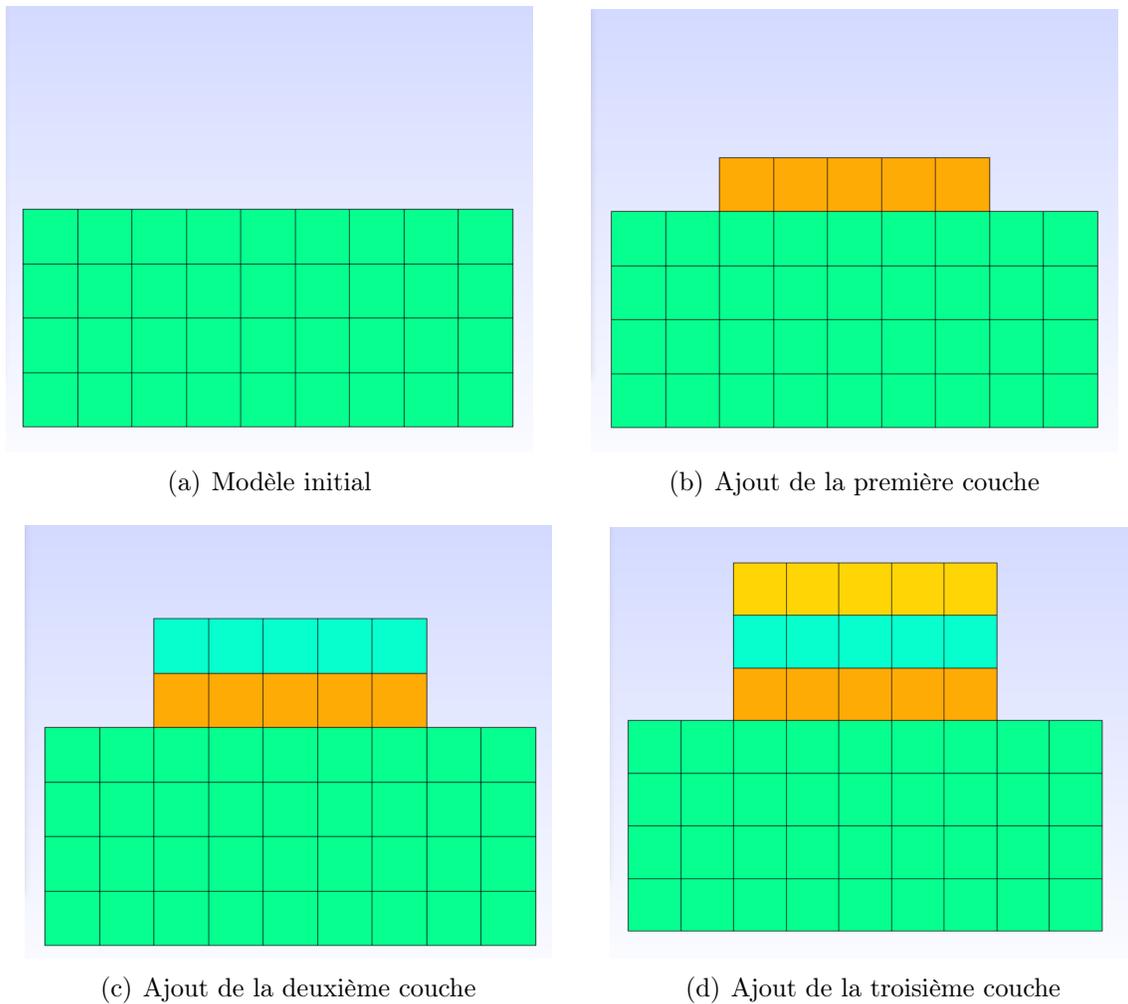


FIGURE 9.4 – Représentation de la deuxième méthode d’ajout de matière

### Troisième méthode

La troisième méthode consiste à utiliser un seul modèle thermique. Mais sur ce modèle, on va doubler les noeuds à l’interface de chaque cordon, ce qui impose une modification du maillage et surtout un maillage plus important.

Le fait de doubler les noeuds va permettre d’empêcher le transfert de chaleur à l’interface des cordons non déposés. Lorsqu’on applique le chargement thermique, on affecte que la partie du modèle qui correspond au métal déjà présent. Ainsi, les cordons non déposés ne voient pas le chargement. Lors de l’ajout d’un nouveau cordon, on recolle les noeuds correspondants en appliquant l’égalité des températures aux noeuds. Cette méthode est considérée comme la plus fiable mais la construction du maillage est fastidieuse d’autant plus avec un grand nombre de passes comme c’est le cas pour ce laser cladding.

## 9.6 Méthode de résolution envisagée

Pour résoudre le problème par *code\_aster*, différentes possibilités ont été envisagées. Elles sont expliquées dans cette section.

### 9.6.1 Méthode 1

La première méthode de résolution expliquée en section 9.5 a été faite, les résultats ne sont cependant pas concluants car le fait d'imposer une conductivité  $\lambda$  de  $10^{-5}$  W/m°C n'est pas suffisante pour désactiver les éléments. Ils perçoivent quand même des gradients de température comme illustré sur les figures 9.5, 9.6, 9.7 et 9.8. Les figures viennent du logiciel de post-traitement de *code\_aster* appelé *Paravis*.

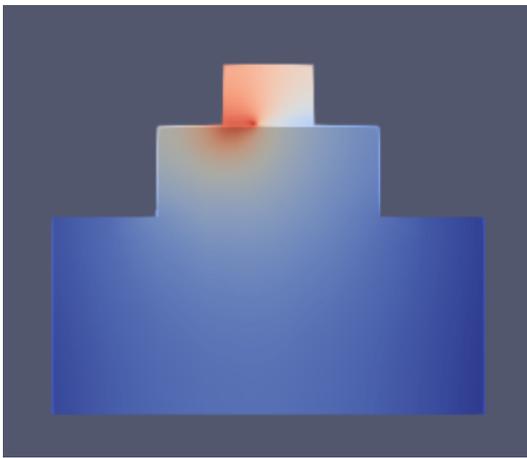


FIGURE 9.5 – Temps  $t=2.28s$

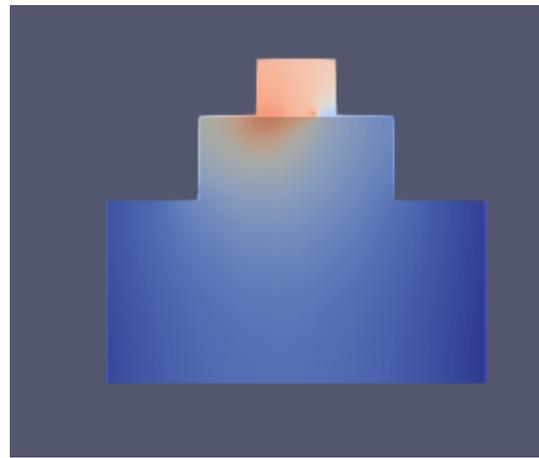


FIGURE 9.6 – Temps  $t=4.8s$

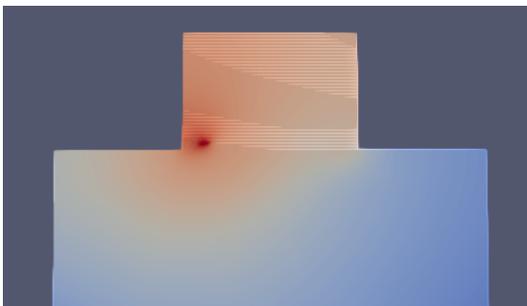


FIGURE 9.7 – Temps  $t=7.58s$

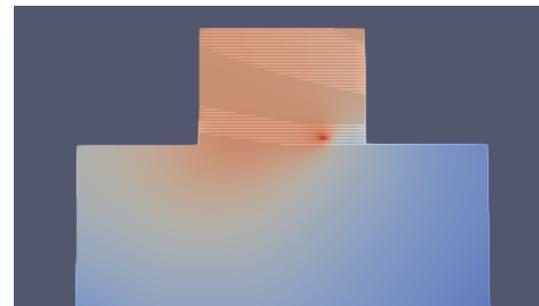


FIGURE 9.8 – Temps  $t=11.66s$

Sur ces figures, on observe bien que l'évolution de la température dans la zone de clad n'est pas bloquée et que la diffusion se fait quand même. Ce qui signifie que le clad est pré-chauffé ce qui ne correspond pas à la réalité du laser cladding. La méthode 1 n'est donc pas à retenir. L'avantage de cette méthode était que l'activation et la désactivation se faisaient de manière automatique sans activer les éléments manuellement. Mais les résultats ne sont pas probants. De plus, le changement brusque de conductivité entraîne des problèmes de

convergence du calcul. Il faut recourir à une autre méthode.

Cette méthode pose un dernier problème, on ne peut modifier la loi que nous avons préalablement imposée avec une conductivité thermique nulle. Or, lorsque l'élément a été soudé, il va refroidir par échange avec l'air ambiant et s'il revient à température ambiante il aura une conductivité thermique nulle et ne sera pas activé, ce qui n'est pas physique bien sûr.

## 9.7 Méthode de l'opérateur *THER\_NON\_LINE\_MO*

Le *code\_aster* propose d'utiliser l'opérateur *THER\_NON\_LINE\_MO* dans le cadre du calcul de soudage. Cet opérateur est puissant, il permet de réaliser le calcul dans un repère mobile ce qui permet d'appliquer une source de chaleur mobile. Le problème de cet opérateur est qu'il ne permet que de calculer la réponse thermique stationnaire. Or, comme expliqué précédemment (section 8.3), le calcul de soudage est un phénomène transitoire.

Cet opérateur calcule des équilibres stationnaires les uns après les autres en fonction des conditions limites. Il ne tient pas compte du temps. Ce qui signifie qu'il ne tient pas compte de l'état initial du modèle.

Notons également que cet opérateur est utilisé pour le chargement mobile stationnaire mais il faut encore gérer l'activation de la matière.

Cet opérateur peut donc s'avérer très utile pour calculer rapidement un ordre de grandeur, ou des bornes de la solution mais il ne permettra pas de simuler Le laser cladding. L'hypothèse de la stationnarité est une hypothèse forte car dans le cadre du soudage la dépendance aux temps est très importante. En effet, comme expliqué précédemment, la vitesse de diffusion de la chaleur n'est que 2x plus faible que la vitesse du laser. Pour pouvoir appliquer cette méthode et faire l'hypothèse de la stationnarité, il aurait notamment fallu que la diffusion de la chaleur soit bien plus importante que la vitesse du laser.

## 9.8 Méthode 2

La première méthode finalement utilisée et modélisée a donc été la méthode 2 (cf. section 9.5). Bien que cette méthode fasse une hypothèse lourde (activation des éléments couche par couche et non élément par élément comme c'est le cas dans *Lagamine*), elle peut être utilisée pour une première approximation rapide.

La procédure à suivre est la suivante :

On importe le maillage complet dans Aster. Ensuite, lorsqu'on va définir les éléments, on ne définit pas les éléments qui ne doivent pas être activés. En d'autres mots, pour le calcul de la première couche, on ne définit pas les éléments de la couche deux jusqu'à la fin. Les éléments définis sont représentés aux figures 9.9 et 9.10 :

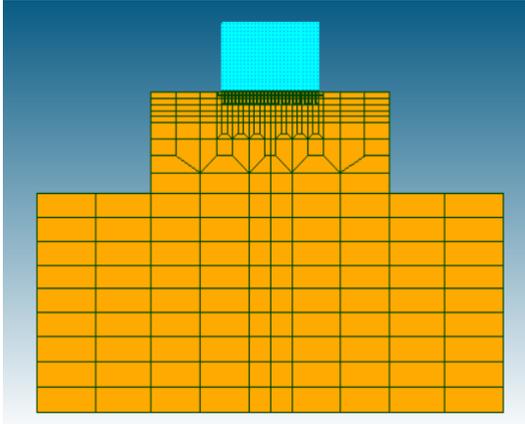


FIGURE 9.9 – Eléments définis pour la passe 1

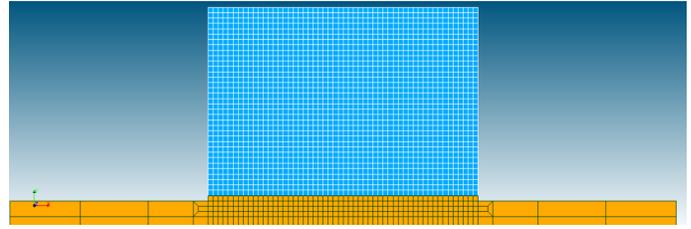


FIGURE 9.10 – Zoom sur le clad

Une fois les éléments définis, on leur assigne leur loi. Nous n'assignons aucune loi aux éléments qui ne sont pas définis, pour Aster ces éléments n'existent pas.

Ensuite, nous appliquons nos conditions limites, le flux de chaleur ainsi que les échanges avec l'air extérieur.

Nous pouvons alors réaliser le calcul de la première passe. Une fois ce calcul terminé, on va calculer le champ de température à l'instant final de la première couche puis nous allons l'appliquer sur un nouveau modèle, celui-ci comprenant la seconde couche (cf. figure 9.11).

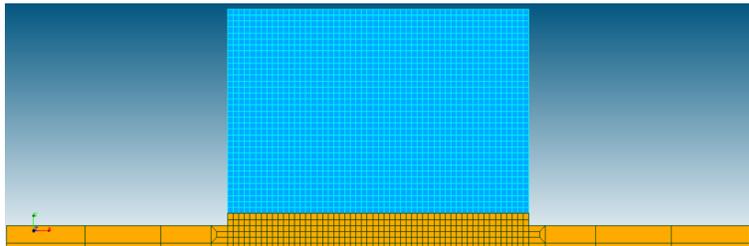


FIGURE 9.11 – Zoom sur le clad du deuxième modèle

L'application de ce champ thermique du premier modèle sur le second n'est pas triviale. Pour ce faire, on procède en quatre étapes :

1. On commence par créer un champ de température initiale sur tout le modèle 2. On impose les conditions limites pour les échanges avec l'air ambiant. On y définit le type d'élément ainsi que les lois comportementales ;
2. On étend le premier champ de température calculé sur le modèle 1 en complétant les nouvelles mailles par le champ qui vient d'être calculé en 1) ;
3. On stocke ce champ dans une nouvelle structure de données ;
4. On impose ce dernier champ de température comme condition initiale pour le calcul de la passe 2.

On peut alors appliquer sur le modèle deux les conditions limites (le flux); on peut donc calculer l'évolution de la température suite aux passages du laser sur la deuxième couche et on procède de la sorte de couche en couche.

L'organigramme ci-dessous, figure 9.12, illustre l'algorithme utilisé pour la modélisation.

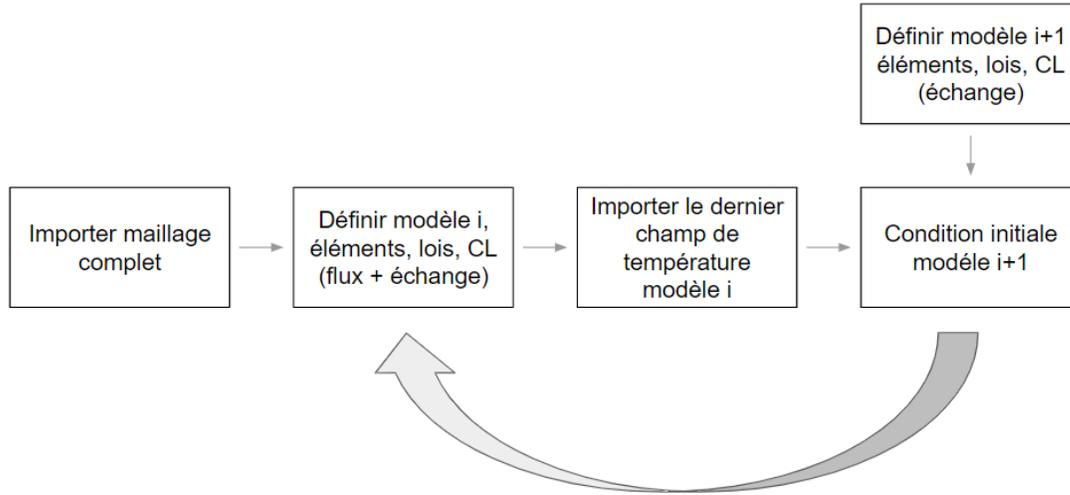


FIGURE 9.12 – Organigramme de la méthode utilisée

## Résultats

A priori les résultats semblent bons, le phénomène physique est bien représenté comme l'illustrent les figures suivantes (figures 9.13, 9.14, 9.15, 9.16, 9.17 et 9.18). Par manque de temps, seules les deux premières couches ont été modélisées.

Comme expliqué à plusieurs reprises, l'application des conditions limites prend énormément de temps. Il faut définir la zone où cette condition est appliquée et cette zone change à chaque pas de temps.

On observe comme sur le modèle *Lagamine* que lorsque nous sommes proches de la frontière, la chaleur se concentre. En effet, elle peut diffuser dans moins de matière. Alors que, lorsque le laser est positionné aux centres, la chaleur peut diffuser dans toute la pièce. L'hypothèse de l'activation couche par couche étant une hypothèse lourde, il a fallu envisager des méthodes de modélisations alternatives.

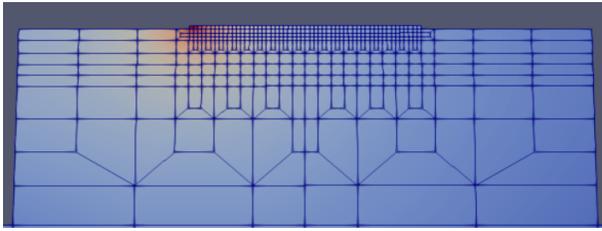


FIGURE 9.13 – Première couche, premiers éléments temps  $t = 0$  sec.

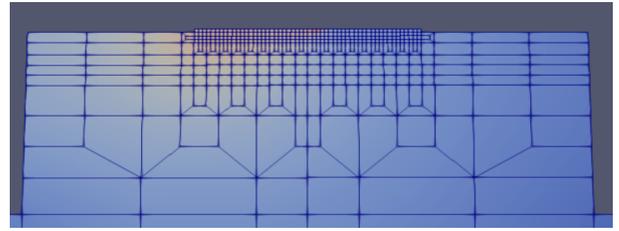


FIGURE 9.14 – Milieu de la première couche temps  $t = 4,4$  s.

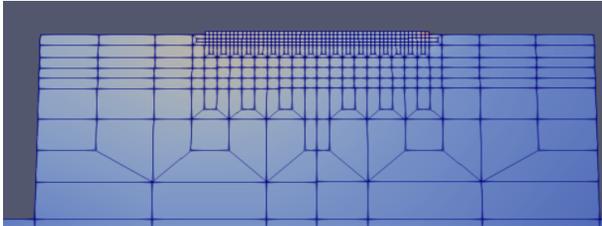


FIGURE 9.15 – Derniers éléments de la première couche temps  $t = 6,86$  s.

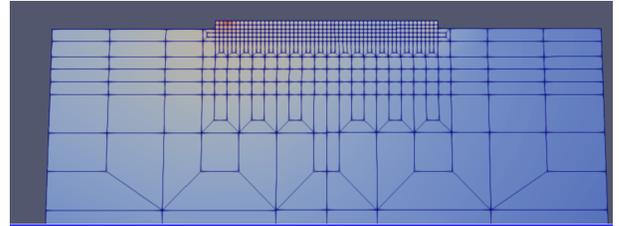


FIGURE 9.16 – Premiers éléments de la deuxième couche temps  $t = 7,26$  s.

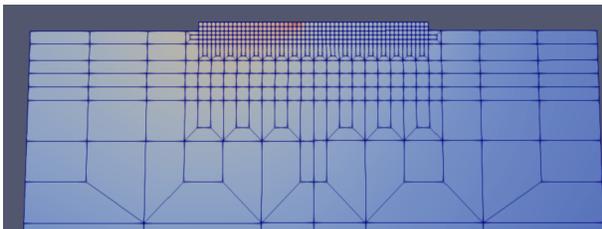


FIGURE 9.17 – Milieu de deuxième couche temps  $t = 9,26$  s.

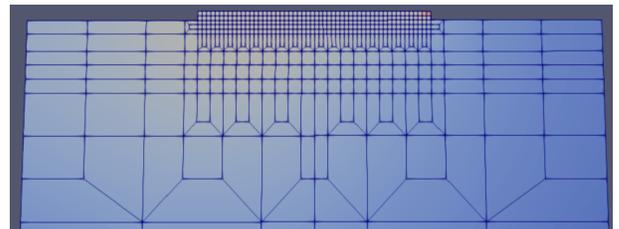


FIGURE 9.18 – Fin de la deuxième couche temps  $t = 13,22$  s.

Et sur les figures ci-dessous 9.19 9.20, en se concentrant sur la zone de clad, on observe de façon plus précise l'activation des couches.



FIGURE 9.19 – Zoom passe 1 avec une seule couche de clad

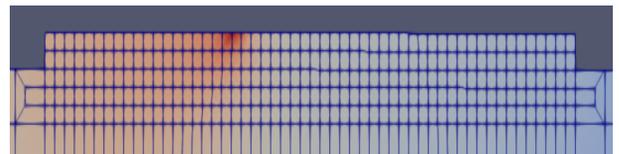


FIGURE 9.20 – Zoom passe 2 avec deux couches de clad

## 9.9 Méthode élément par élément

Avec l'aide de l'équipe de Dr. Van-Xuan Tran, nous avons trouvé un moyen d'activer les éléments élément par élément et non plus couche par couche comme c'est le cas pour la méthode précédente (cf. section 9.8). Cette nouvelle méthode n'est pas une méthode recommandée par Aster parce que plus lente, nos fichiers sont très gros donc c'est très difficile à mettre en oeuvre et en pratique.

Cette méthode est une combinaison des deux méthodes précédentes. On va activer les couches les unes après les autres et dans ces couches on imposera une conductivité thermique nulle pour les éléments que nous activerons successivement en changeant la loi comportementale des éléments à activer en fonction du temps.

Cependant, il faut toujours définir les groupes du maillage à la main. Ces groupes changent à chaque pas de temps, cette méthode prend donc énormément de temps de main d'oeuvre et de calcul.

Dans le cadre de ce TFE, une seule couche a été effectuée. Mais, un code simulant toutes les couches a également été implémenté, ce code fonctionne avec des lois de matériaux qui ne varient pas trop. Cependant, avec les lois comportementales qui doivent être utilisées dans le cadre de ce TFE, le code ne converge pas étant donné que la simulation est extrêmement longue je n'ai pas eu le temps de régler ce problème mais je suis certain que ce code pourra être retravaillé et ensuite utilisé pour simuler complètement l'étude.

## Résultats

Cette méthode apporte toutefois un problème important. Le fait d'imposer une conductivité nulle introduit de petites erreurs ponctuelles dans le calcul. En effet, sous le laser, on peut voir que l'élément adjacent à l'élément de conductivité nulle a une température négative. Cette erreur ne se propage pas car les éléments sont de conductivité nulle mais ce n'est pas du tout physique. Ce problème vient de la conductivité nulle : il faut trouver un moyen de contourner ce problème. Le code élément par élément est encore à travailler afin de régler ce problème.

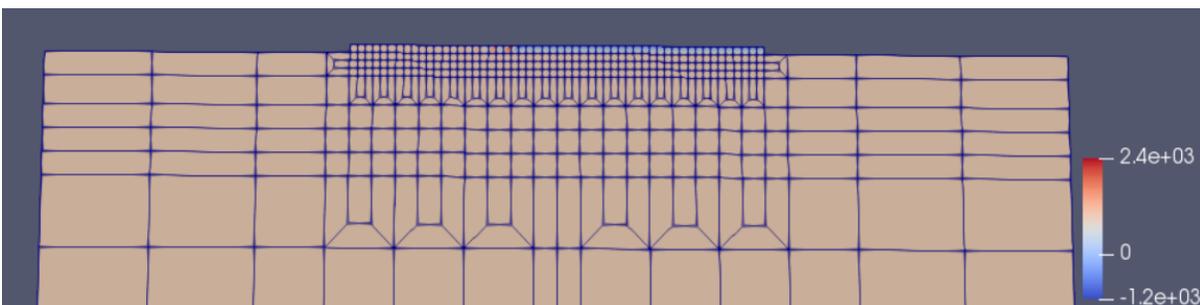


FIGURE 9.21 – Résultats *code\_aster* méthode élément par élément

## 9.10 Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses. En effet, beaucoup d'hypothèses ont été posées durant la modélisation.

La première chose à faire est de trouver un moyen d'automatiser la procédure d'application des conditions limites et la procédure d'activation et de désactivation des éléments. Le développement de routine pour simuler l'activation des éléments ainsi que le mouvement du faisceau laser est primordial pour des applications industrielles. En l'état actuel, ce n'est pas vivable de travailler comme ceci. L'ingénieur perd beaucoup trop de temps à encoder des données.

Sur les modèles Aster, lorsque nous imposons une conductivité thermique nulle nous devons prendre garde aux deux points suivants :

- s'assurer que la convection est correctement modélisée. En effet, dans le processus réel, les éléments adjacents à des éléments inactifs sont à priori en contact avec l'air ambiant. Ils échangent donc par convection avec l'air. Ces éléments sont à côté d'éléments à conductivité nulle dans la modélisation, les échanges thermiques sont donc bloqués. Il s'agit d'une hypothèse importante des calculs réalisés sous le *code\_aster* ;
- s'assurer d'un comportement mécanique correct. Le fait de bloquer la conductivité ne désactive pas les éléments d'un point de vue mécanique. Mais, comme nous faisons une étude thermique pure ce problème n'importe pas.

Ce travail s'est limité à une analyse thermique pure. Une perspective très intéressante serait d'y ajouter les interactions mécaniques (dilatation de l'acier entre autres) et passer donc à un modèle thermo-mécanique. Ensuite, il serait intéressant de prendre en compte les microstructures et les interactions métallurgiques et alors modéliser un problème thermo-métallurgique.

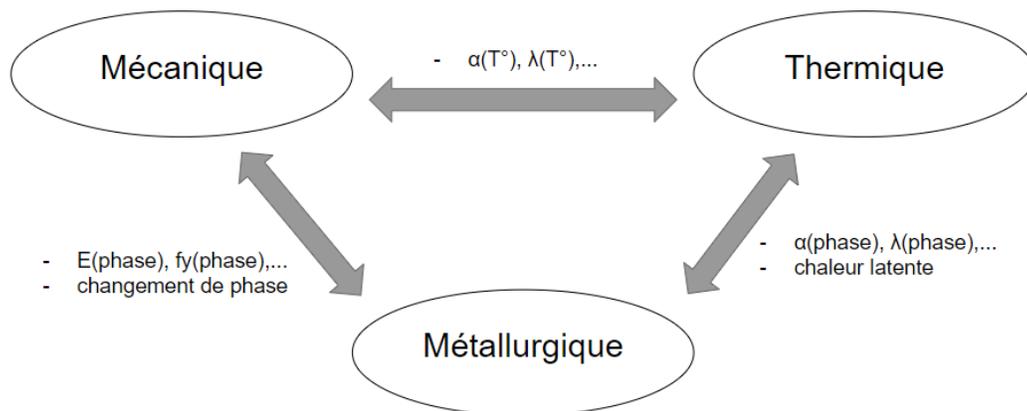


FIGURE 9.22 – Interaction thermique, mécanique et métallurgique

Ensuite, concernant le flux de chaleur, de nombreuses simplifications ont été faites. Premièrement, le flux est de forme constante ce qui n'est pas le cas en réalité. Ensuite, le gaz

inerte utilisé pour réaliser Le laser cladding n'a pas été pris en compte. La source de chaleur a simplement été modélisée comme une source d'énergie appliquée sur des noeuds. La puissance de cette source d'énergie a été calculée pour que les températures correspondent aux températures du thermo-couple lors de l'expérience.

Enfin, il faudrait modéliser ce modèle en 3D et non plus 2D ce qui permettrait de lever quelques hypothèses posées jusqu'à présent telles que :

- donner un sens physique aux flux de chaleur appliqués et ainsi pouvoir étudier, entre autre, le facteur d'absorption  $\beta$  ;
- prendre en compte la convection et la radiation à travers les surfaces latérales ;
- etc.

# Chapitre 10

## Comparaison

La comparaison se fera en deux parties. D'une part, une comparaison sur l'utilisation du *code\_aster* ; d'autre part, une comparaison sur les résultats obtenus.

### 10.1 Comparaison des résultats

Afin d'analyser les résultats de façon optimale, l'analyse se fera en trois parties :

1. Comparaison de l'évolution de la température en fonction du temps d'un point situé proche de la zone du cladding ;
2. Comparaison de la taille de la zone de fusion (ZF) ;
3. Comparaison de l'évolution du champ de température (ZAT).

La comparaison se fera entre 3 modèles :

- Le modèle *Lagamine* qui a été calibré avec des valeurs expérimentales. Ce sera notre modèle de référence ;
- Le modèle *code\_aster* dont l'activation des éléments s'est faite couche par couche (méthode expliquée en section 9.8) ;
- Le modèle *code\_aster* dont l'activation des éléments s'est faite élément par élément (méthode expliquée en section 9.9).

#### 10.1.1 Comparaison de l'évolution de la température en fonction du temps d'un point situé proche de la zone du cladding

Pour cette comparaison, l'endroit à partir duquel nous avons comparé les graphiques d'évolution de la température en fonction de la température est illustré figure 10.1.

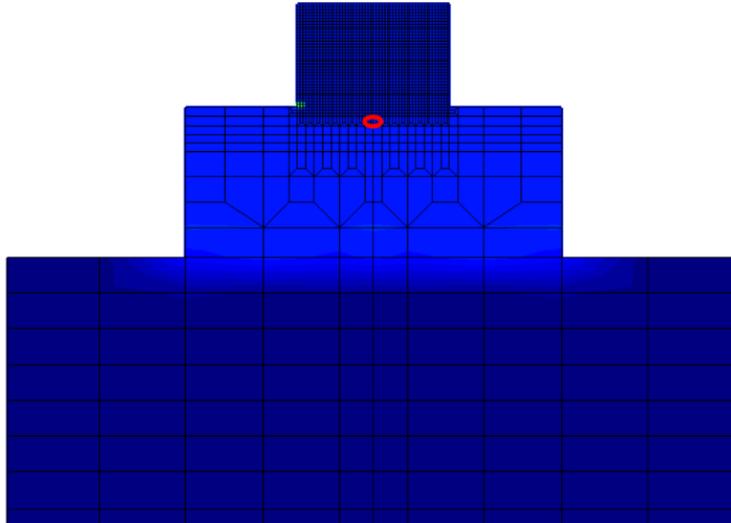


FIGURE 10.1 – Point de référence

Les figures 10.5, 10.6 et 10.7 sont les graphiques de températures en fonction du temps et des méthodes utilisées.

N.B. : La figure 10.7 est décalée de 1 seconde car dans le calcul, les conditions initiales sont appliquées pendant la première seconde afin de faire converger le code avant de commencer l'application du flux.

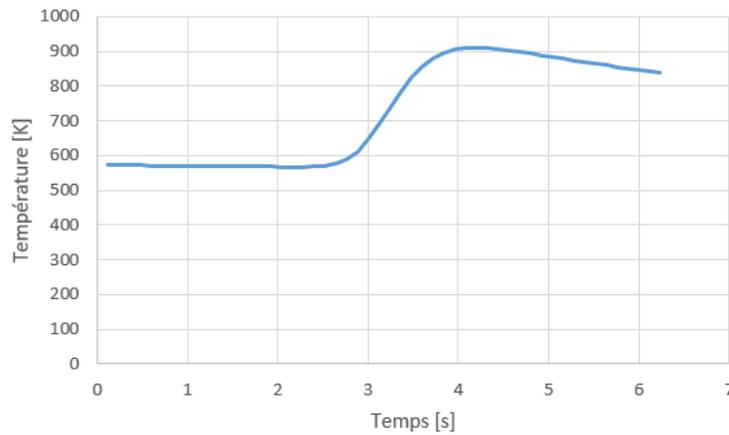


FIGURE 10.2 – Évolution température [K] en fonction du temps [s] pour *Lagamine*

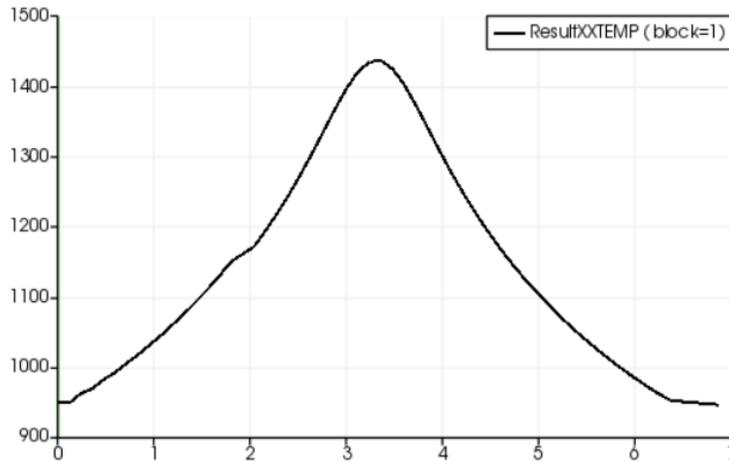


FIGURE 10.3 – Évolution température [K] en fonction du temps [s] pour le *code\_aster* méthode couche par couche

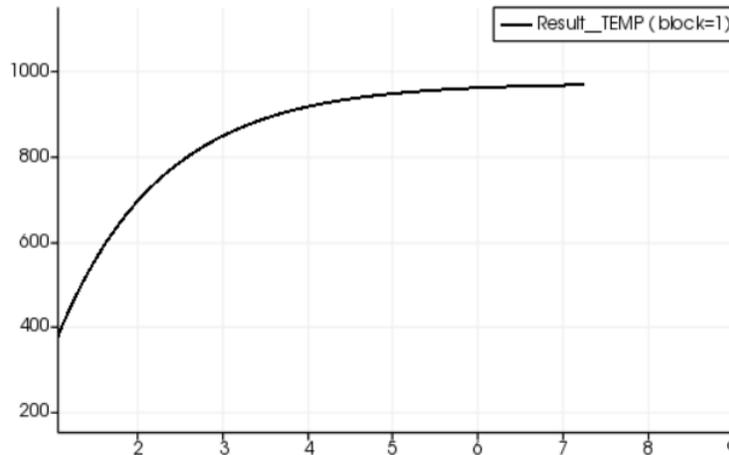


FIGURE 10.4 – Évolution température [K] en fonction du temps [s] pour le *code\_aster* méthode élément par élément

On observe de ces figures plusieurs anomalies. D'une part, la méthode couche par couche ne semble pas prendre en compte l'état précédemment calculé et les gammes de températures observées sont bien plus élevées que la méthode de référence *Lagamine*. Pour la méthode élément par élément la température initiale n'est pas bonne. Mais les gammes de températures atteintes semblent être les bonnes cependant la courbe ne diminue jamais même si elle n'augmente plus à la fin de la couche ce qui signale un problème avec les conditions d'échange entre la pièce et l'extérieur. Ce problème est plus que probablement lié à la conductivité thermique qui bloque les échanges de chaleur en haut du substrat. C'est néanmoins cette méthode qui donne les résultats les plus proches de la réalité.

### 10.1.2 Comparaison de la taille de la zone de fusion

L'évolution de la taille de la zone de fusion consiste à afficher sur des graphiques la taille de la zone où la matière est fondue et donc liquide, soit la taille de la zone où les températures

sont supérieures à 1600 K. Cette comparaison doit se faire à un même instant, l'instant choisi est lorsque le laser est au milieu de la première couche soit en  $t=3,2s$ . Ces zones pour les trois différents codes sont illustrées aux figures 10.5, 10.6 et 10.7.

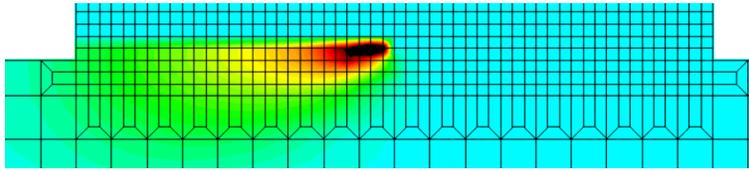


FIGURE 10.5 – Zone de fusion *Lagamine*

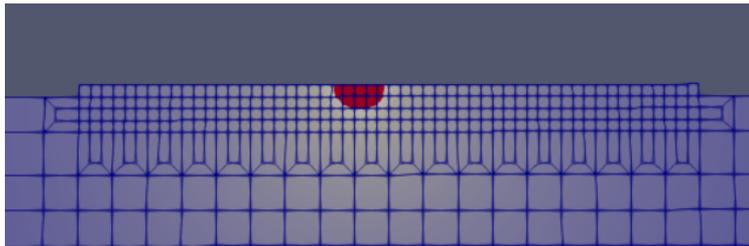


FIGURE 10.6 – Zone de fusion *code\_aster* méthode couche par couche

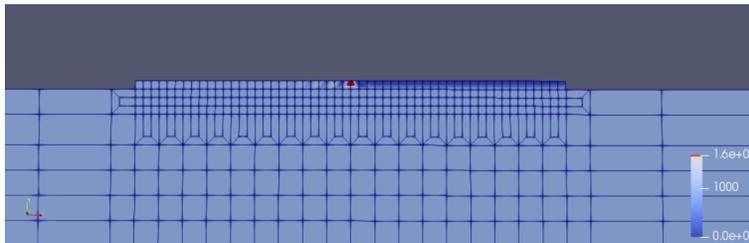


FIGURE 10.7 – Zone de fusion *code\_aster* méthode élément par élément

Pour ce point de comparaison, c'est la modélisation couche par couche qui donne les résultats les plus proches de la modélisation de *Lagamine*. En effet, la zone semble être la même du moins du même ordre de grandeur même si elle est un peu plus élevée.

### 10.1.3 Comparaison de l'évolution du champ de température

Pour comparer les champs de températures, il faut à nouveau se fixer des temps. Cette comparaison se fera donc en 3 temps distincts : au début, au milieu et à la fin de la première couche soit respectivement aux temps  $t=0.36$ ,  $t=3.24$  et  $t=6.26$ . Les champs sont illustrés aux figures 10.8, 10.9, 10.10.

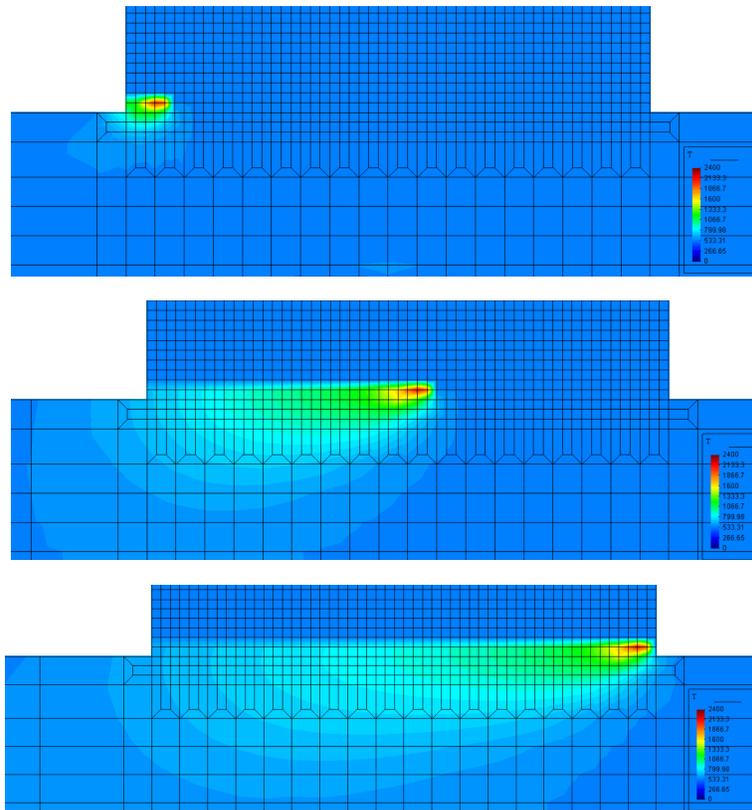


FIGURE 10.8 – Champ de température *Lagamine*

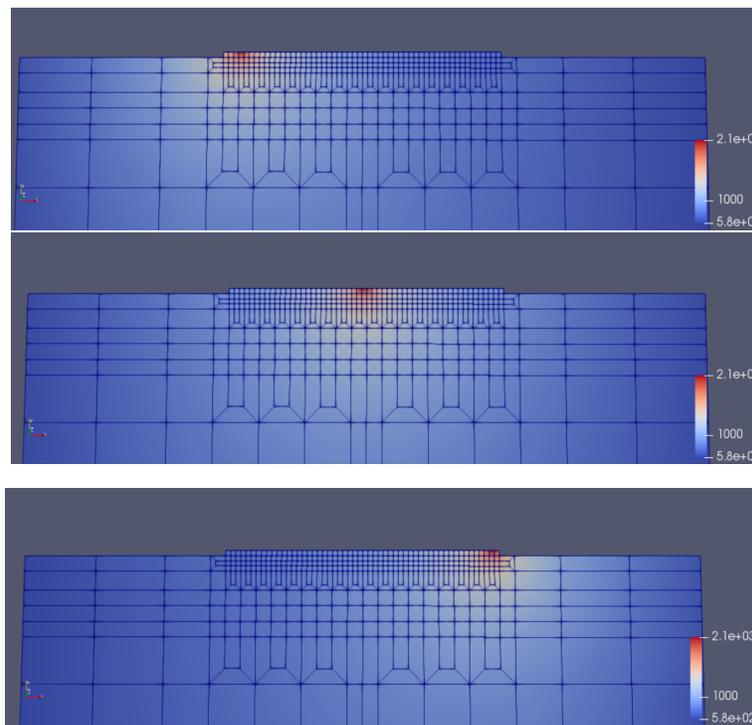
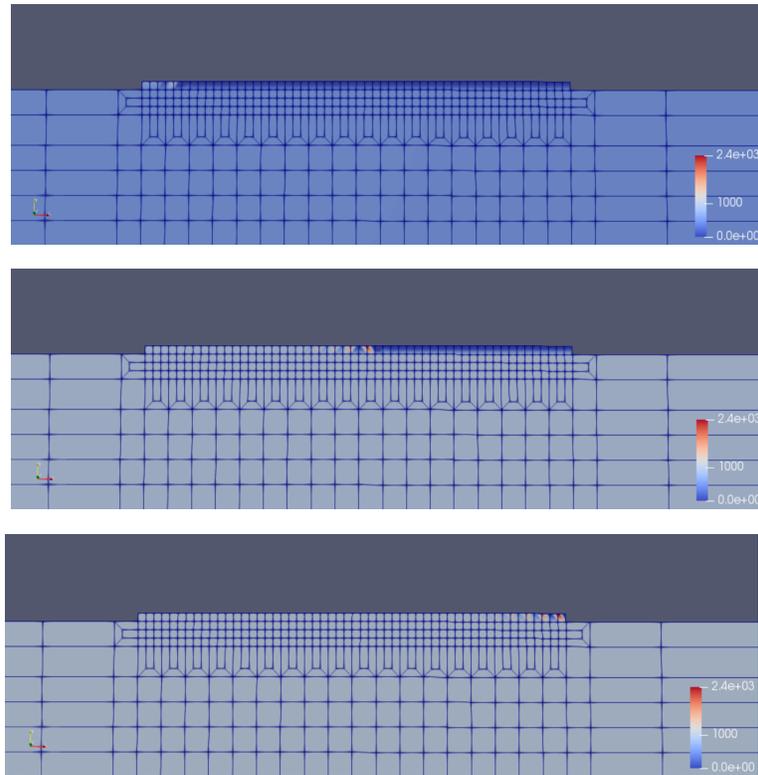


FIGURE 10.9 – Champ de température *code\_aster* méthode couche par couche

FIGURE 10.10 – Champ de température *code\_aster* méthode élément par élément

En ce qui concerne la comparaison des champs de températures, c'est la méthode élément par élément qui se rapproche le plus de la solution de référence du modèle *Lagamine*. Cependant, la figure 10.9 montre tout de même une bonne tendance dans l'évolution de la température.

## Conclusion

Nous pouvons en conclure que la méthode couche par couche, bien plus facile à mettre en oeuvre et plus rapide donne de bons résultats. Bien que cette technique fait appel à une hypothèse importante, elle pourrait être utilisée pour donner des bornes de calcul de manière bien plus rapide.

La méthode élément doit encore être travaillée car les résultats ne sont pas optimaux cependant, on sent bien le potentiel de cette méthode. Une fois le problème de la température négative réglé, on pourra estimer la zone de fusion et cette méthode se rapprocherait donc très fort de la méthode du code *Lagamine*.

## 10.2 Comparaison de l'utilisation

Le premier point à aborder est l'installation des logiciels. Le code *Lagamine* est bien plus facile à télécharger que ce soit le code de base ou même les versions améliorées de M. Tran. Comme expliqué en introduction du chapitre 9, l'installation du *code\_aster* n'est pas triviale.

Le deuxième point de comparaison concerne les entrées des deux logiciels *Lagamine* et *code\_aster*. *Lagamine* utilise en règle générale deux fichiers :

- le data file comprenant les données initiales tels que le maillage, les lois, les conditions d'appuis, les types d'éléments,...
- le Strategy file, fichier de stratégie au format ex.dat qui définira la stratégie de chargement.

En ce qui concerne le *code\_aster*, c'est un peu différent : nous avons aussi deux fichiers mais le premier ne contient que le maillage et les différentes entités. Alors que le second, le fichier d'exécution au format .COMM contient toutes les opérations du calcul, les lois de comportement, les types d'éléments, les conditions initiales, les conditions limites... En résumé, tout le calcul. La procédure de fonctionnement des deux codes est illustrée sur la figure 10.11.

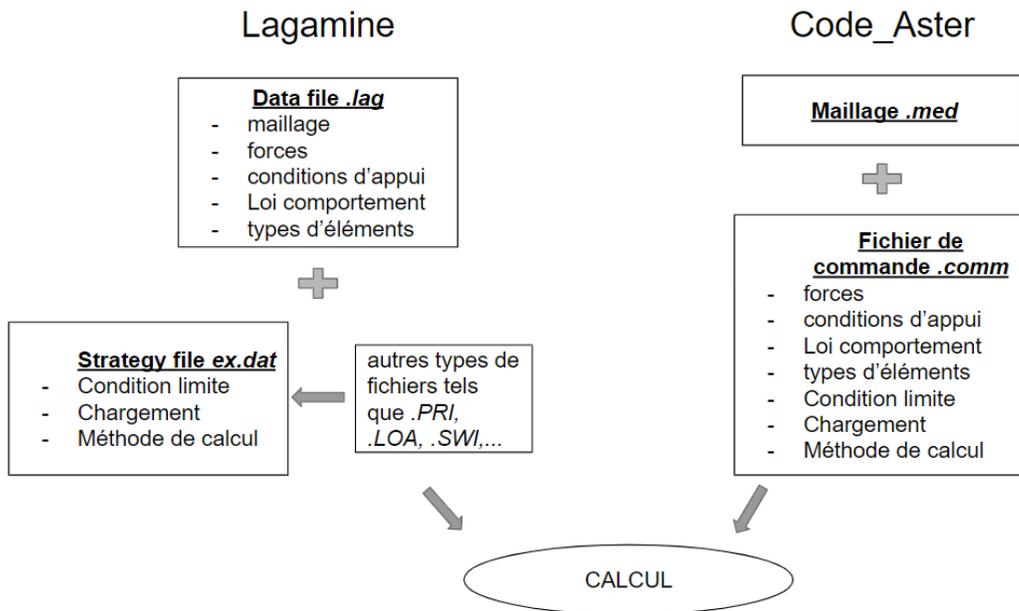


FIGURE 10.11 – Illustration de la méthodologie des fichiers input

*Lagamine* possède aussi la possibilité de pouvoir faire appel à d'autres fichiers à partir du Strategy file tels que les fichiers .PRI, Switch, .LOA, etc. D'une part, l'avantage du *code\_aster* est d'avoir tout dans un même fichier et ne pas devoir ouvrir plusieurs fichiers pour comprendre le code ; d'autre part, le désavantage est que ce fichier est extrêmement long et rend la lecture bien plus compliquée que pour *Lagamine*.

Avant d'aborder la comparaison des étapes clés de la résolution du Laser cladding. Il faut mettre en avant l'efficacité de l'interface SALOME du *code\_aster* par rapport au document texte de *Lagamine*. La plateforme de SALOME est très confortable à utiliser, c'est vraiment un énorme plus en comparaison à *Lagamine*. De plus, sans un éditeur de texte plus évolué que le bloc note de windows ou le Text editor de Linux, concevoir un fichier *Lagamine* n'est pas simple. La principale difficulté est de devoir respecter les formats. Il faut respecter un certain nombre d'espaces dans le fichier alors que les fichiers .COMM de *code\_aster* sont aux formats de Python ce qui est bien plus agréable.

Ensuite, le *code\_aster* utilise beaucoup de techniques transparentes pour l'utilisateur. Comme expliqué en section 7.4, c'est un confort indéniable pour l'utilisateur, il n'est pas nécessaire de dimensionner les vecteurs comme pour *Lagamine* par exemple. Cependant, le revers de la médaille est que le *code\_aster* fait beaucoup d'opérations de manière automatique y compris certaines qui n'ont pas été explicitement demandées ce qui, si l'utilisateur n'y prend pas garde, peut conduire à une interprétation des résultats erronée.

Concernant le maillage, pour avoir réalisé plusieurs exercices afin de me familiariser avec le *code\_aster*, et donc avoir utilisé le mailleur SALOME, je dirais qu'il est plutôt facile d'utilisation. On peut rapidement réaliser des pièces de géométries complexes avec un peu d'entraînement. L'interface de SALOME est très bien faite et il existe énormément de tutoriels ou vidéos explicatives.

En revanche, c'est dans ce fichier de maillage qu'il faut définir les différentes entités qui serviront à l'étude. La création d'entités est très longue et fait perdre énormément de temps à l'utilisateur. Il faudrait absolument trouver un moyen d'automatiser cette procédure avec différents algorithmes.

Dans le *code\_aster*, la définition des éléments est bien plus simple, nous avons une moins grande distinction entre les éléments comme c'est le cas pour *Lagamine* (éléments CONRA et BLZ2T). Dans le *code\_aster*, il suffit de donner un type aux éléments comme par exemple éléments thermiques.

Concernant les lois de comportements, *code\_aster* est aussi plus facile d'utilisation. Les bibliothèques de *code\_aster* et *Lagamine* contiennent un très grand nombre de lois pré-encodées. Mais surtout, dans le *code\_aster*, il est très simple d'ajouter un paramètre à une loi. Un paramètre comme de l'écroutissage, de l'endommagement, etc. alors que sur *Lagamine* ce n'est pas aussi simple, il faut trouver une loi qui permet de prendre en compte tous les paramètres étudiés. De plus, la loi utilisée dans *Lagamine* définit par après les éléments à utiliser. L'interface SALOME du *code\_aster* est très certainement la plus grosse plus value en comparaison au logiciel *Lagamine*.

L'application des conditions limites est le gros défaut de *code\_aster*. La procédure semble à priori simple mais lorsqu'on a un chargement mobile comme c'est le cas pour Le laser cladding, c'est extrêmement long. Il est possible d'automatiser la procédure d'application de la charge pour gagner un peu de temps mais il n'est pas possible d'automatiser la création des entités. Ainsi, pour chaque pas de temps, on doit définir manuellement à quel endroit on doit appliquer la charge. Sur *Lagamine*, c'est bien plus simple grâce aux fichiers .LOA.

En ce qui concerne le modèle, *Lagamine* est restreint à un type de modèle (exemple : un modèle avec une analyse thermique 2D). Le *code\_aster*, lui, permet dans une même simulation de réaliser plusieurs calculs avec plusieurs analyses différentes. Pour des études plus compliquées, il s'agit d'un énorme avantage. Après l'étude thermique, sur le *code\_aster*, il est possible de simuler assez rapidement une étude mécanique sur le clad qui vient d'être posé. Sur *Lagamine* c'est moins évident et moins immédiat.

En conclusion, comme le disent de nombreux ingénieurs notamment Jean Pierre Aubry auteur de *Beginning with code\_aster A practical introduction to finite element method using code\_aster*; "*en raison de ses nombreuses capacités, code\_aster est un logiciel très complexe, et son interface utilisateur très peu convivial rend la courbe d'apprentissage assez raide*". De nombreuses fonctionnalités d'aster sont intéressantes et permettent de faire gagner du temps à l'utilisateur mais *Lagamine* est un code bien plus efficace en ce concerne la modélisation de ce type de phénomène.

# Chapitre 11

## Conclusion

Ce mémoire a pour ambition d'étudier numériquement un procédé de fabrication additive appelé Le laser cladding. Ce procédé de fabrication additive par projection de poudre possède énormément d'applications dans des domaines divers et variés. L'étude de ce procédé est réalisée sur deux logiciels éléments finis. Ces deux logiciels sont :

- *Lagamine* ;
- *code\_aster* .

Après avoir chargé le maillage, il a fallu définir les phénomènes physiques mis en jeu pour pouvoir introduire les différentes subtilités liées à la modélisation de ce procédé telles que la modélisation de la source de chaleur, les lois thermiques appliquées, les conditions limites utilisées.

Pour chacune de ces sections, des hypothèses différentes sont posées dans chacun des logiciels. Concernant les conditions limites, elles sont liées à des stratégies d'activation d'éléments décrites telles qu'elles ont été mises en œuvre dans les différents modèles.

C'est pour cette problématique d'activation des éléments que l'hypothèse la plus forte a été adoptée. Dans le cas de la modélisation sous *code\_aster* , l'activation des éléments, suite à l'apport de poudre, est faite couche par couche dans un premier temps puis élément par élément avec désactivation d'élément par imposition de conductivité quasi-nulle alors que pour *Lagamine* l'activation se fait élément par élément sans avoir recours à une conductivité nulle.

Les profils de températures ont alors été analysés dans la pièce. Afin de valider les modèles proposés, le code *Lagamine* a été calibré grâce à un essai expérimental correspondant. Une corrélation entre les ensembles de données numériques est apparue. Cette corrélation est plus forte pour le code *code\_aster* qui simule élément par élément, en raison de l'hypothèse prise. Dans l'ensemble, la stratégie de modélisation présentée englobe les variables clés du processus, ce qui permet de prédire les effets thermiques du processus [20].

En conclusion, le modèle présenté dans ce travail, bien qu'il ne soit pas suffisamment complet à ce stade pour être utilisé dans des applications industrielles, est une première étape importante vers le développement d'un modèle complet pour simuler Le laser cladding sous

*code\_aster* .

Les problèmes qui ont été abordés, les difficultés inattendues rencontrées notamment lors de l'installation de *code\_aster* , aideront les autres développeurs de modèles de laser cladding à réaliser des modèles de plus en plus évolués.

La mise en place d'un modèle de plus en plus poussé devrait permettre de comprendre et prévoir l'impact des paramètres prépondérants du laser cladding, des paramètres tels que :

- le préchauffage ;
- la vitesse du laser ;
- la puissance du laser ;
- le facteur d'absorption
- etc.

Cela permettrait d'obtenir des pièces de qualité optimale. Ainsi, Le laser cladding deviendrait de plus en plus efficace ce qui engendrerait une augmentation de son utilisation par des industriels et permettrait de concurrencer d'autres technologies de fabrications additives.

# Bibliographie

- [1] L. Duchêne H.-S. Tran N. Hashemi R. Carrus A. Mertens A.M. Habraken R.T. Jardin, J. Tchoufang Tchoundjang. *Thermal histories and microstructures in Direct Energy Deposition of a High Speed Steel thick deposit*. Materials Letters 236 (2019) 42–45.
- [2] code\_aster. [https://www.code-aster.org/V2/doc/v12/en/man\\_u/u2/u2.03.05.pdf](https://www.code-aster.org/V2/doc/v12/en/man_u/u2/u2.03.05.pdf). Téléchargé le 11/05/20.
- [3] Cyprien Rusu. A guide to thermal analysis. <https://feaforall.com/author/cyprien-rusugmail-com/> Téléchargé le 05/05/2020.
- [4] kuleuven. <https://www.mtm.kuleuven.be/onderzoek/Ceramics/research/additive-manufacturing/metals>. Téléchargé le 09/03/2020.
- [5] J. Hart. *Additive manufacturing*. Massachusetts Institute of Technology, December 2013.
- [6] Krista N. Amato-Sara M. Gaytan Jennifer Hernandez Diana A. Ramirez Patrick W. Shindo Frank Medin Ryan B. Wicker Lawrence E. Murr, Edwin Martinez. *Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing : Examples of 3D Materials Science*. Journal of Materials Research and Technology.
- [7] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_s%C3%A9lective\\_par\\_laser](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion_s%C3%A9lective_par_laser). Téléchargé le 09/03/2020.
- [8] I. Shishkovsky D. Kotoban, S. Grigoriev. *Study of 3D laser cladding for Ni85Al15 superalloy*. 8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014, Physics Procedia 56 ( 2014 ) 262 – 268.
- [9] Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cladding\\_\(metalworking\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cladding_(metalworking)). Téléchargé le 09/03/2020.
- [10] fst. <https://www.fst.nl/about/laser-cladding/>. Téléchargé le 11/05/20.
- [11] Laminedef. <https://www.laminedef.fr/99-chutes>. Téléchargé le 09/03/2020.
- [12] Erasteel. <https://www.erasteel.com/fr/technologies/metallurgie-conventionnelle/>. Téléchargé le 16/02/2020.
- [13] lalanguefrancaise. <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition-laminage/>. Téléchargé le 16/02/2020.
- [14] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Four\\_%C3%A0\\_arc\\_%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_%C3%A0_arc_%C3%A9lectrique). Téléchargé le 16/02/2020.
- [15] chimix. <http://www.chimix.com/an7/sup/A58c.htm>. Téléchargé le 29/05.
- [16] Ngoc Thuy Trinh. *Sur la modélisation du comportement thermomécanique et métallurgique des aciers. Application au procédé de soudage et de traitements thermiques. Sciences de l'ingénieur [physics]*. Ecole Polytechnique X, 2008. Français. ffpastel-00004738f.

- [17] H-S Tran T. Maurizi-Enrici Enrici O. Dedry Ruben Jardin Laurent Duchêne A. Mertens A. M. Habraken S. Fetni, T. Niccolini. *2D thermal finite element analysis of laser cladding of 316L + WC Composite coatings First work. Metal Forming 2020*. Power point.
- [18] N. Hashemi J.T. Tchuindjang R. Carrus L. Duchêne A. Mertensand A.M. Habraken. R.T. Jardin, H.S. Tran. *2D FE Simulations of High Speed Steel Laser Cladding Process*. Powerpoint.
- [19] L.Papeleux J.-P. Ponthot. C.Laruelle, R.Boman. *Finite Element activation strategy in the numerical simulation of Additive Manufacturing Processes*. Poster, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Liège, Belgium.
- [20] T.L. Lee b A.T. Clare T.R. Walker a, C.J. Bennett a. *A validated analytical-numerical modelling strategy to predict residual stresses in single-track laser deposited IN718*,. Materials & Design Volume 180, 15 October 2019, 107909.
- [21] S. Singh R. Singh. *Additive Manufacturing : An Overview*. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering 2017.
- [22] Madjid Djemai Jean Jacques Fouchet Brigitte Bacroix Guy Dirras Amine Hattal, Thierry Chauveau. *Effect of nano-yttria stabilized zirconia addition on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V parts manufactured by selective laser melting*,. International Journal of Mechanical Sciences 151 (2019) 609–621.
- [23] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Impression\\_3D](https://fr.wikipedia.org/wiki/Impression_3D). Téléchargé le 09/03/2020.
- [24] Aurélio Araújo Luís Reis Elodie Pinto Nuno Alves Rui Santos Joao Pedro Mortágua Miguel Seabra, José Azevedo. *Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes*. Procedia Structural Integrity Volume 1, 2016, Pages 289-296.
- [25] Mohsin Talib Mohammed. *Mechanical Properties of SLM-Titanium Materials for Biomedical Applications : A Review*. Materialstoday : PROCEEDINGS Volume 5, Issue 9, Part 3, 2018, Pages 17906-17913.
- [26] Deqiao Xie Ning Mao Jianfeng Zhao Zongjun Tian Chang jiang Wang Lida Shen Yue Du, Huixin Liang. *Design and statistical analysis of irregular porous scaffolds for orthopedic reconstruction based on voronoi tessellation and fabricated via selective laser melting (SLM)*. Materials Chemistry and Physics Volume 239, 1 January 2020, 121968.
- [27] Lining Sun Xiangfeng Meng Youqiang Xing Kedong Zhang, Xuhong Guo. *Fabrication of coated tool with femtosecond laser pretreatment and its cutting performance in dry machining SLM-produced stainless steel*. Journal of Manufacturing ProcessesVolume 42June 2019Pages 28-40.
- [28] Alexey Gamberg Sergey Kugaevskii, Eugenius Pizhenkov. *The effectiveness of additive SLM-technologies in the manufacture of cutting tools*. Materials Today : Proceeding-sVolume 19, Part 52019Pages 1977-1981.
- [29] ARCAM. *Electron beam melting. in the forefront of additive manufacturing*. 2015.
- [30] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_par\\_faisceau\\_d%27%C3%A9lectrons](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion_par_faisceau_d%27%C3%A9lectrons). Téléchargé le 09/03/2020.

- [31] Alfredo Liverani Cees Bil Alessandro Ceruti, Pier Marzocca. *Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context : The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing*. Journal of Computational Design and Engineering Volume 6, Issue 4 October 2019 Pages 516-526.
- [32] Carlos Vila Cecilio López Ciro A. Rodríguez Sharon Torres-Carrillo, Héctor R. Siller. *Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades*. Journal of Cleaner Production, Volume 246, 10 February 2020, Article 119068.
- [33] ARCAM. *GKN Aerospace and Arcam join forces to develop EBM*. Metal Powder Report, Volume 70, Issue 3 May–June 2015, Page 146.
- [34] Abdulrahman Al-Ahmari Sherif ElWatidy Wadea Ameen Khaja Moiduddin, Saied Darwish. *Structural and mechanical characterization of custom design cranial implant created using additive manufacturing*. Electronic Journal of Biotechnology Volume 29 September 2017 Pages 22-31.
- [35] Roberto Raffaeli Alida Mazzoli, Michele Germani. *Direct fabrication through electron beam melting technology of custom cranial implants designed in a PHANToM-based haptic environment*. Materials & Design, Volume 30, Issue 8, September 2009, Pages 3186-3192.
- [36] K. Singh Manmeet Kaur. *Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications*. Materials Science and Engineering : C, Volume 102, September 2019, Pages 844-862.
- [37] W. Tong-Raed Ajlouni R. Kovacevic M. Jamshidinia, L. Wang. *Fatigue properties of a dental implant produced by electron beam melting (EBM)*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 226, December 2015, Pages 255-263.
- [38] W. Tong-R. Kovacevic M. Jamshidinia, L. Wang. *The bio-compatible dental implant designed by using non-stochastic porosity produced by Electron Beam Melting (EBM)*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 214, Issue 8, August 2014, Pages 1728-1739.
- [39] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Frittage\\_s%C3%A9lectif\\_par\\_laser](https://fr.wikipedia.org/wiki/Frittage_s%C3%A9lectif_par_laser). Téléchargé le 09/03/2020.
- [40] Wikipedia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Frittage>. Téléchargé le 09/03/2020.
- [41] a3dm. <https://www.a3dm-magazine.fr/news/fabrication-additive-metallique/procede-de-fabrication-additive-clad>. Téléchargé le 09/03/2020.
- [42] M.M.Abdelhameed M.A.Shalaby S.C.Veldhuis M.A. ElHakim, M.D.Abad. *Wear behavior of some cutting tool materials in hard turning of HSS*. Tribology International 44 (2011) 1174–1181.
- [43] V. Jayakumar P. Haja Syeddu Masooth. *Experimental investigation on surface finish of drilled hole by TiAlN, TiN, AlCrN coated HSS drill under dry conditions*. Materials Today : Proceedings, Volume 22, Part 3, 2020, Pages 315-321.
- [44] N. C. Marín B. Gómez M. H. Miguélez J. A. Canteli, J. L. Cantero. *Cutting performance of TiCN–HSS cermet in dry machining*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 210, Issue 1, 1 January 2010, Pages 122-128.

- [45] Shrikant V. Joshi Krishna Valleti, C. Rejin. *Factors influencing properties of CrN thin films grown by cylindrical cathodic arc physical vapor deposition on HSS substrates*. Materials Science and Engineering : A Volume 54530 May 2012 Pages 155-161.
- [46] Loris Saufnay. *Intérêt des aciers laminés à haute limite d'élasticité dans le domaine de la construction métallique*. ULIEGE, Faculté des Sciences appliquées, Mémoire. Téléchargeable sur <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/6797>.
- [47] A. Lisson R. Machado Emmanuel O. Ezugwu Antônio M. Souza Jr. Fla'vio J. da Silva, Sinésio D. Franco. *Performance of cryogenically treated HSS tools*. Wear 261 (2006) 674–685.
- [48] Eun-Mi Lee Do-Sik Shim, Gyeong-Yun Baek. *Effect of substrate preheating by induction heater on direct energy deposition of AISI M4 powder*. Materials Science & Engineering A 682 (2017) 550–562.
- [49] Sang-Hu Park Do-Sik Shim, Ki-Yong Lee. *Bending strength of tool steel preheated to various temperatures and layered by direct energy deposition*. Materials Science & Engineering A 744 (2019) 548–559.
- [50] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivit%C3%A9\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivit%C3%A9_thermique). Téléchargé le 01/04/2020.
- [51] E. Toyserkani M. Alimardani and J. Huisson. *A 3d dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser freeform fabrication process*. Optics and Laser in Engineering, 2007.
- [52] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9\\_thermique\\_massique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_massique). Téléchargé le 01/04/2020.
- [53] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9\\_thermique\\_isobare](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_isobare). Téléchargé le 01/04/2020.
- [54] Wikipedia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Convection>. Téléchargé le 01/04/2020.
- [55] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient\\_de\\_transfert\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_transfert_thermique). Téléchargé le 01/04/2020.
- [56] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_thermique). Téléchargé le 01/04/2020.
- [57] A. Chakravarti J. Godalk and M. Bibby. *A new finite element model for welding heat source*. Metall. Trans., 15B :299-305, 1984.
- [58] C. Lequesne. *Modeling of fractures in heavy steel welded beam-to-column connection submitted to cyclic loading by finite elements*. PhD thesis, University of Liege, 2009.
- [59] A. Melendo, A. Coll, M. Pasenau, E. Escolano, and A. Monros. [www.gidhome.com](http://www.gidhome.com), 2016. [Online ; accessed Jun-2016].
- [60] A. Coll, R. Ribó, M. Pasenau, E. Escolano, J. Suit. Perez, A. Melendo, A. Monros, and J. Gárate. *GiD v.13 User Manual*, 2016.
- [61] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Code\\_Aster](https://fr.wikipedia.org/wiki/Code_Aster). Téléchargé le 05/03/2020.
- [62] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Oracle\\_VM\\_VirtualBox](https://fr.wikipedia.org/wiki/Oracle_VM_VirtualBox). Téléchargé le 05/04/2020.

- [63] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ubuntu\\_\(syst%C3%A8me\\_d%27exploitation\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ubuntu_(syst%C3%A8me_d%27exploitation)). Téléchargé le 05/04/2020.
- [64] C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmsh : a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11) :1309-1331, 2009.
- [65] Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/SALOME\\_\(logiciel\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/SALOME_(logiciel)). Téléchargé le 05/03/2020.
- [66] Aubertduval. [https://www.aubertduval.com/wp-media/uploads/sites/2/pdf/fr\\_MOC2.pdf](https://www.aubertduval.com/wp-media/uploads/sites/2/pdf/fr_MOC2.pdf). Téléchargé le 05/04/2020.
- [67] Alliance-mim. [https://alliance-mim.com/wp-content/uploads/2016/12/FicheTechnique\\_42CrMo4.pdf](https://alliance-mim.com/wp-content/uploads/2016/12/FicheTechnique_42CrMo4.pdf). Téléchargé le 05/04/2020.
- [68] Autodesk. <https://forums.autodesk.com/t5/robot-structural-analysis/article-maillage-incoherent-sur-les-bords>. Téléchargé le 05/04/2020.
- [69] D. Rosenthal. *Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting*. *Welding Journal*, 20(5) :220-234, 1941.
- [70] Romain Brusten. *LASER CLADDING FINITE ELEMENT MODELLING. Application to Ti6Al4V*,. ULIEGE, Faculté des Sciences appliquées, Mémoire. Téléchargeable sur <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/2390>.
- [71] H. Paydasb-A. Mertens R.T. Jardin L. Duchêne R. Carrus J. Lecomte-Beckers A.M. Habraken H.-S. Tran, J.T. Tchuindjang. *3D thermal finite element analysis of laser cladding processed Ti-6Al-4V part with microstructural correlations*. *Materials & Design* 128 (2017) 130–142.
- [72] M. R. M. Toff A. Mubarak, E. Hamzah. *Study of macrodroplet and growth mechanisms with and without ion etchings on the properties of TiN coatings deposited on HSS using cathodic arc physical vapour deposition technique*. *Materials Science and Engineering : A*, Volume 474, Issues 1–2, 15 February 2008, Pages 236-242.
- [73] Mikael Collan Jyrki Savolainen. *How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models ? – Review of Literature*. *Additive Manufacturing* 32 (2020) 101070.
- [74] Danny Sims-Waterhouse Ian Maskery Peter Woolliams Richard Leach Vicente M. Rivas Santos, Adam Thompson. *Design and characterisation of an additive manufacturing benchmarking artefact following a design-for-metrology approach*. *Additive Manufacturing* 32 (2020) 100964.
- [75] T. Ahmed and H. Rack. *Phase transformation during cooling in alpha + beta titanium alloys*. *Materials Science and Engineering*, A243 :206\_211, 1998.
- [76] L. Zhang et al. H. Attar, M. Calin. *Manufacture by selective laser melting and mechanical behaviour of commercial pure titanium*. *Materials of science and Engineering A*, 593 :170-177, 2014.
- [77] D. Doytier et al. M. Boivineau, C. Cagran. *thermophysical properties of solid and liquid ta6v alloy*. *International Journal of Thermophysics*, 27(2) :507529, March 2006.
- [78] R. Charlier. *Methodes numeriques non-lineaires- Partie 2. University of Liege, 2012*. Notes de cours.
- [79] A. Salmi M. Chiumenti, M. Cervera and C. Agelet de Saracibar. *Finite element model of multi-pass welding and shaped metal deposition processes*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199 :2343-2359, 2010.

- [80] E. Toyserkani S. Corbin and A. Khajepour. *Cladding of fe-al coating on mild steel using laser assisted powder deposition*. Journal of Material Journal of Materials Science, Vol. 354, n.1-2, pp.48-57, 2003.
- [81] CRC. *Advanced, and Manufacturing*. Additive manufacturing categories processes and materials.
- [82] N. Dahorte and S. Harimkar. *Laser fabrication and machining of materials*. Spring Science+ Business Media, pages 42-43, 2007.
- [83] O. de Weck. *Finite Element Method - Engineering Design and Rapid Prototyping*. Massachussetts Institute of Technology, January 2004.
- [84] H. El Cheikh and B. Courant. *3d finite element simulation to predict the induced thermal field in case of laser cladding process and half cylindrer laser clad*. Photonics and Optoelectronics, 1(3) :55-59, October 2012.
- [85] S. Branchu et al. H. El Cheikh, B. Courant. *Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process*. Optic and Laser Engineering, 50(3) :413-422, 2012.
- [86] M. Ferreira J. Feng and R. Vilar. *Steel cladding of ni-cr/al2o3 composite coating on aisi 304 stainless steel*. Surface and coating technology, vol.88, n.1-3, pp.212-218, 1997.
- [87] D. Rosen I. Gibson and B. Stucker. *Additive manufacturing technologies*. Springer US, Boston, MA, 2010.
- [88] G. Gilles. *Experimental study and modeling of the quasi-static mechanical behavior of Ti6Al4V at room temperature*. PhD thesis, University of Liege, March 2015.
- [89] D.L. and. Romero et al. M. Gri th, J. Keicher. *Laser engineering net shaping for the fabrication of metallic components*. American Society of Mechanical Engineers, Materials Division, Advanced Materials : Development, Characterization Processing, and Mechanical behavior. Vol.74, pp. 175-176, 1996.
- [90] M. Labudovic and R. Kovacevic. *Modelling of the laser surface nitriding of ti-6al-4v alloy. Analysis of heat transfer and residual stresses*. Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, 2001.
- [91] H. Thomas R. Lewis, K. Morgan and K. Seetharamu. *The finite element method in heat transfer analysis*. John Wiley and Sons Ltd, Ba ns Lane, Chichester, 1996.
- [92] T. Lips and F. B. *A comparison of commonly used re-entry analysis tools*. Acta Astronautica, 57(2-8) :312323, 2005.
- [93] J. Mazumder and A. Kar. *Solid solubility in laser cladding*. Journal of Materials, 39 :18-23, 1987.
- [94] G. Shannon M. McLean and W. Steen. *Laser direct casting high nickel alloy components*. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, vol.3, pp.21-3-21-16, 1997.
- [95] H. Paydas et al. A. Mertens, S. Reginster. *Mechanical properties of alloy tial4v and stainless steel 316l processed by selective laser melting : influence of out-of-equilibrium microstructures*. Powder Metallurgy, 57(3) :184-189, 2014.
- [96] S. Mikhlin.. *Variational methods in mathematical physics*. Oxford, New York, Pergamon Press, 1964.

- [97] K. Mills. *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*. Antony Rowe Ltd, 1st ed, Wiltshire, England, 2002.
- [98] A. Van Bael A. Mohammadi, H. Vanhove and J. Duffou. *Toward accuracy improvement in single point incremental forming of shallow part formed under laser assisted conditions*. International Journal of material Forming, 2010.
- [99] A. Neira Arce. *Thermal Modelling and Simulation of Electron Beam Melting for Rapid Prototyping on Ti-6Al-4V Alloys*. Materials science and engineering, Raleigh, North Carolina, 2012.
- [100] F. Pascon. *2D1/2 thermal-mechanical model of continuous casting of steel using finite element method*. PhD thesis, University of Liege, 2003.
- [101] O. Uyehara V. Pavelec, R. Tanbakuchi and P. Myers. *Welding*. Welding Journal, 48 :295-305 suppl, 1969.
- [102] R. Carrus J. Lecomte Beckers H. Paydas, A. Mertens and J. Tchoufang Tchuindjang. *Laser cladding as a repair technology for ti6al4v alloy : influence of building strategy on micro-structure and hardness*. Submitted to Journal of Materials and Design.
- [103] O. Rigo and C. Engel. *Etat actuel des fabrication additive pour les applications metalliques*. Sirris, November 2013.
- [104] R. Kupfer U. Ritter, W. Kahrman and R. Glardon. *Laser coating proven in practice*. Sulzer technical review. Vol. 73, n.3, pp18-20, 1991.
- [105] M. Soodi. *Hacladding engineering is now equipped with state-of-the-art laser processing facility*. 2015.
- [106] F. Cheng K. Tam and H. Man. *Laser surfacing of brass with ni-cr-al-mo-fe using various laser processing parameters*. Materials of science and Engineering A, Vol.325, n.1-2, pp.365374, 2003.
- [107] et al. B. Thacker, S. Doebbling. *Concepts of Model Verification and Validation*. Los Alamos national laboratory. charmian schaller edition, October 2014.
- [108] A. Khajepour E. Toyserkani and S. Corbin. *3-d finite element modeling of laser cladding by powder deposition : Effects of powder feed rate and travel speed on the process*. Journal of Laser Applications, 15(3) :153-160, 2004.
- [109] A. Khajepour E. Toyserkani and S. Corbin. *Laser Cladding*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2005.
- [110] V. Tuninetti Vasquez and A. Habraken. *Impact of anisotropy and viscosity to model the mechanical behavior of ti-6al-ti alloy*. Materials Science & Engineering, A, 605 :39-50, 2014.
- [111] R. Goodbridge et al. J. Vaithilingam, S. Kilsby. *Functionalisation of ti6al4v components fabricated using selective laser melting with bioactive compound*. Materials Science and Engineering, 46(1) :52-61, January 2015.
- [112] P. Krakhlmalev I. Yadroistev and I. Yadroitsava. *Selective laser melting of ti6al4v alloy for biomedical applications : Temperature monitoring and microstructural evolution*. Journal of Alloys and Compounds, 583 :404-409, 2014.
- [113] W. Brandt J. Yang, S. Sun and W. Yan. *Experimental investigation and 3d finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of ti6alti alloy*. Journal of Materials Processing Technology, 210 :2215-2222, 2010.

- [114] ARCAM. *GKN Aerospace and Arcam join forces to develop EBM*. Metal Powder Report, Volume 70, Issue 3May–June 2015, Page 146.
- [115] Fazati Bourahima. *Évolutions microstructurales et défauts générés par laser cladding lors du dépôt de Ni sur des moules de verrerie en alliage de Cu-Ni-Al et en fonte GL*. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Paris-Saclay, 2019. Français. ffNNT : 2019SACLS017ff. fftel-02044203f.
- [116] Bachir Mezrag. *Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT.*. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Montpellier; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2015. Français. ffNNT : 2015MONTTS275ff. fftel-01244380v2f.

