2014-ENAM-0050

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Automatique "

présentée et soutenue publiquement par

Rezak MEZARI

Le 17 Décembre 2014

Etude du contrôle de procédé de projection laser pour la fabrication additive :

Instrumentation. Identification et Commande

Directeur de thèse : Pascal AUBRY

Jury

M. Alain MICAELLI, Docteur HDR, LIST, CEA Saclay	Président
M. Gilles DUC, Professeur HDR, Département Automatique, SUPELEC	Rapporteur
M. Pascal MOGNOL, Professeur HDR, Département Mécatronique, ENS Rennes	Rapporteur
M. Patrice PEYRE, Directeur de Recherche CNRS, PIMM, Arts et Métiers ParisTech – Paris	Examinateur
M. Pascal AUBRY, Docteur HDR, Arts et Métiers ParisTech – Paris	Examinateur
Mme. Laëtitia KIRSCHNER, Airbus Group Innovations	Invitée
M. Didier BOISSELIER, IREPA LASER	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Centre de Paris

PIMM - Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux

Remerciement

C’est avec une certaine émotion et beaucoup de sincérité que je consacre ces quelques lignes en signe de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.

En premier lieu, sans qui, cette thèse n’aurait jamais eu lieu, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Pascal AUBRY. Je voudrais le remercier pour sa disponibilité, son soutien, sa confiance, sa générosité, sa bonne humeur qu'il m'a accordée tout au long de ces années et ses conseils qui ont été nombreux et importants. Je remercie bien entendu Thierry MALLOT, qui a su être présent à tout instant et à me pousser à toujours faire mieux. J’ai également une pensée amicale pour Kevin VERDIER, dont je garderai l’exemple ainsi que le souvenir de nos discussions.

Je remercie chaleureusement les Professeurs Gilles DUC et Pascal MOGNOL pour avoir accepté le difficile rôle de rapporteur de ces travaux, pour le temps qu’ils ont accordé à la lecture de cette thèse et à l’élaboration de leur rapport, ainsi que Patrice PEYRE, Alain MICAELLI, Laetitia KIRSCHNER et Didier BOISSELIER d’avoir accepté de prendre part à mon jury.

La réalisation de ce travail s’appuie également sur un environnement qui est essentiel. A ce titre, je voudrais remercier le personnel de mon école doctorale et mon laboratoire d’accueil, le PIMM plus particulièrement Anne BOUTEVILLE, Gilles REGNIER, Florence DUMARD, Claude ROY, Florence DEBEIRE, Christophe CANU, Farida ZIDEKHILE, Odile ANGELE et Frédéric VALES qui m’ont permis de m’intégrer rapidement et de réaliser mes projets. Je voudrais également remercier tous mes collègues du projet FALEFEL. Je garderai un bon souvenir des discussions animées au cours des réunions plénières… Plus particulièrement, je remercie Gilles SURDON, Franck HENRIROUX, Claude LEONETTI, Stéphane ABED, Toinou BLANC, Pierre VINSON, Guillaume MARION, Christophe COLIN, Philippe CORRE, Thomas VILARO, Lucas DEMBINSKI, Antoine DROUOT, Jean-François FROMENTIN, Stephane LAVIGNOTTE, Igor SMUROV et Andrey GUSAROV.

Une pensée émue pour mes camarades de l’équipe LASER que j'ai été amené à côtoyer et avec lesquels j’ai partagé tous ces moments de doute et de plaisir. Tous ces instants autour d’un sandwich ou d’un café ont été autant de moments de détente indispensables. Un merci plus particulier à Myriam GHARBI, Jérimie GIRARDOT, Anas NIFA, Koji HIRANO, Maryse MULLER, Sébastien POUZET, Morgan DAL, Rémy FABRO, Frédéric COSTE, DUPUY Corinne, Cyril GORNY, GUINAULT Alain, Lounès ILLOUL, Laurent BERTHE, Yann ROUCHAUSSE, Damien COURAPIED et Matthieu SCHNEIDER.

Je voudrais aussi témoigner ma gratitude envers mes enseignants, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué à ma formation en Algérie et en France.

Mes derniers remerciements iront évidemment à tous ceux qui forment mon “cocon“ familial. Je pense tout d’abord à tous les membres de la famille MEZARI et ZENAIDI de m'avoir soutenu et qui ne cessent de m'encourager à aller plus loin. Un grand merci à mes deux sœurs Kahina et Lilia ainsi qu’à mon oncle Djamel. Enfin, ma reconnaissance la plus profonde s'adresse à mes parents pour leurs sacrifices, leurs soutiens et leur appui moral permanent, malgré la distance qui me sépare d'eux. Qu’ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l’aboutissement de leurs efforts ainsi que l’expression de ma plus affectueuse gratitude. J’espère être à la hauteur de leur fierté inconditionnelle. Je tiens également à remercier mes beaux-parents pour leur soutien et leur présence sans faille.

Mes derniers remerciements et non les moindres, s’adressent à mon épouse Asma, qui, pour mon plus grand bonheur partage ma vie et mes expériences professionnelles depuis leurs origines. Elle a su, tout au long de cette thèse m’encourager dans ma voie. Son soutien a été sans faille et je lui serai éternellement reconnaissant d’avoir été la pierre angulaire de cette entreprise. Elle est la clef de ma réussite, sans elle à mes côtés, cette réalisation n’aurait pas la même saveur.

Table des matières

Table des matières ..... *iv*

Introduction générale *1*

I Projection laser et contrôle de procédé *5*

I.1 Introduction *6*

I.2 Le procédé de projection laser *6*

I.2.1 Principe de fonctionnement **6**

I.2.2 Paramètres du procédé **7**

I.3 Modèles phénoménologiques *9*

I.4 Nécessité du contrôle de procédé en projection laser *11*

I.4.1 Principales caractéristiques du procédé pour le contrôle **12**

I.4.2 Défauts et instabilités du procédé de projection laser **12**

A. Perturbations 13

B. Défauts géométriques : Instabilités des dimensions du cordon 13

C. Autres instabilités ou défauts 14

I.4.3 Définition des entrées-sorties pour le contrôle procédé **14**

I.4.4 Traçabilité versus contrôle-commande **16**

I.4.5 Apports du contrôle/commande - Quelle solution et quels outils? **17**

I.4.6 Les limites des contrôles-commande existants **18**

I.5 Contexte et cadre industriel de l'étude *19*

I.5.1 Le projet FALAFEL **19**

I.5.2 Les besoins industriels vis-à-vis du procédé **20**

I.6 Objectifs du travail de thèse et méthodologie *21*

I.7 Conclusion *23*

II Développement des capteurs du procédé *25*

II.1 Introduction *26*

II.2 Analyse bibliographique des capteurs pour le procédé de projection laser *26*

II.2.1 Introduction **26**

II.2.2 Mesure de température **27**

II.2.2.1 Mesure de température par contact 28

II.2.2.2 Mesure de température sans contact 28

II.2.3 Mesures géométriques **33**

II.2.3.1 La vision active 33
II.2.3.2 La vision passive 36
II.2.3.3 Mesure de la position en Z du bain liquide par vision passive 37
II.2.4 Synthèse des limites des systèmes existants et propositions de développement 40
II.3 Description du poste expérimental de projection 41
II.3.1 Le laser 41
II.3.2 La table de déplacement 42
II.3.3 Poudre, distributeur de poudre et buse de projection 43
II.4 Développement d'un moyen de caractérisation des buses de projection 44
II.4.1.1 Caractérisation du jet de poudre 44
II.4.1.2 Position du plan focal 46
II.4.1.3 Evaluation du rendement de fusion 47
II.5 Mise en place de l'installation de projection laser 49
II.5.1 La chaine d'acquisition et de traitement de données 49
II.5.2 Le laser 51
II.5.2.1 La caractérisation du faisceau laser 51
II.5.2.2 Suivi de puissance 52
II.5.2.3 La commande en puissance 52
II.5.3 Système de déplacement 53
II.5.3.1 Mesure de la vitesse de déplacement 53
II.5.3.2 Commande en vitesse 53
II.5.4 Etalonnage du débit de poudre 54
II.6 Mise en œuvre du capteur de mesure du bain liquide 54
II.6.1 Introduction 54
II.6.2 Détermination du matériel de vision pour le contrôle/commande de procédé de projection laser 55
II.6.2.1 Choix de technologie : CCD ou CMOS ? 55
II.6.2.2 Sélection des caméras 57
II.6.3 Mesure 2D du bain liquide 61
II.6.3.1 Le montage 61
II.6.3.2 Les traitements d'images développées 63
II.6.3.3 Extraction des caractéristiques géométriques du bain 71
II.6.4 Mesure de la position en Z du bain liquide par dispositifs coaxiaux 73
II.6.4.1 Les différents dispositifs coaxiaux 73
II.6.4.2 Evaluation de dispositifs coaxiaux 74
II.6.4.3 Conclusion partielle : choix d'un dispositif de mesure 75

II.6.5 Développement d'un dispositif hors axe de mesure en Z 75
II.6.5.1 Le montage 75
II.6.5.2 Développement du modèle du bain 77
II.6.6 Incertitudes sur les mesures du bain 91
II.7 Conclusion 93
III Modélisation et identification du procédé 95
III.1 Introduction 96
III.2 Les modèles pour le contrôle procédé – Etat de l'art 97
III.2.1 Modèles de connaissance 97
III.2.2 Modèles expérimentaux 99
III.3 Synthèse et démarche retenue 101
III.4 Etudes du procédé en boucle ouverte 102
III.5 Modèles du procédé de projection laser, identification et résultats 105
III.5.1 Chaine d'acquisition et de génération de signaux 106
III.5.1.1 Choix des points de fonctionnement 107
III.5.1.2 Description des actionneurs 107
III.5.1.3 Choix de la fréquence d'échantillonnage 108
III.5.1.4 Choix de l'entrée d'excitation 108
III.5.1.5 Elaboration du jeu des données entrée-sortie 110
III.5.1.6 Prétraitement des données 111
III.5.2 Choix de la structure des modèles locaux 113
III.5.3 Estimation des paramètres 114
III.5.4 Résultats d'identification 115
III.5.5 Validation des résultats 117
III.5.6 Comparaison avec les données expérimentales 120
III.6 Analyse du comportement thermique 121
III.7 Conclusion 123
IV Contrôle-Commande du procédé 125
IV.1 Introduction 126
IV.2 Etat de l'art du contrôle-commande du procédé de projection laser 126
IV.3 Stratégie adoptée 131
IV.4 Rappel sur la commande robuste 132
IV.4.1 Le problème $H\infty$ standard 132
IV.4.2 Stabilisation et performance robustes 133
IV.5 Application de la commande $H\infty$ sur le procédé 134

IV.5.1 Commande de la largeur du bain 134
IV.5.1.1 Les ON/OFF laser – Controleur anti-Windup 136
IV.5.1.2 Contrôle de la largeur sur un mur 137
IV.5.1.3 Robustesse en suivi de trajectoire 138
IV.5.1.4 Rejet de perturbations 139
IV.5.1.5 Correction des effets des défauts géométriques de la pièce 140
IV.5.1.6 Correction des effets des défauts de positionnement du substrat 141
IV.5.1.7 Correction des effets des défauts de centrage de la buse 142
IV.5.2 Commande de la hauteur du bain 142
IV.5.3 Analyse des interactions et commande multivariable 143
IV.5.3.1 Rappel des interactions possibles entrées-sorties 143
IV.5.3.2 Méthodes d'analyse des interactions 144
IV.5.3.3 Identifications de la matrice de transfert 148
IV.5.3.4 Analyse des interactions 149
IV.5.3.5 Application et résultats 150
IV.5.4 Vers la commande multi modèles – gain scheduling 151
IV.5.4.1 Robustesse aux variations de paramètres et analyse du domaine de stabilité 151
IV.6 Conclusion 153
Conclusions et perspectives 155
Bibliographie 161

Introduction générale

Les applications utilisant les procédés de fabrication directe par laser et projection de poudre sont en pleine expansion, en particulier, dans l'aéronautique. En effet, les industriels ont réussi à exploiter, en partie, les avantages de ces techniques notamment dans la diminution des coûts, les délais de développement et de fabrication, comparées à des techniques conventionnelles (usinage, moulage, emboutissage). On retrouve d'autres avantages à ces techniques, tels que l'absence de perte de matière, l'approvisionnement plus simple, et une grande liberté dans la forme des objets fabriqués encore impossibles auparavant. La pièce réalisée à l'aide de ce procédé coûte en effet moins cher, et nécessite 4 fois moins de temps de réalisation qu'en usinage conventionnel[1]. Ces avantages ont largement contribué au développement de nombreuses applications dans le domaine de l'automobile, médecine, ……etc.

Néanmoins, cette technologie prometteuse fait état de quelques points durs, auxquels il faut faire face pour rendre le procédé de fabrication pleinement opérationnel. Cela concerne, bien évidemment l'intégrité structurelle des pièces. En effet, la fabrication de pièces par projection laser est confrontée aux problèmes d'instabilités du procédé. Lorsque ces phénomènes ne sont pas maîtrisés, cela conduit à des défauts (résistances mécaniques insuffisantes, porosités trop importantes, mauvais états de surface,..etc), qui, selon leur répartition et leur taille, risquent d'engendrer des non conformités, de détériorer les caractéristiques mécaniques des pièces et qui peuvent représenter un coût de post-traitement non négligeable, selon la complexité de la pièce. Par conséquent, il est primordial de maîtriser le procédé d'élaboration, afin de préserver cette intégrité structurelle de la pièce et pour que le coût de fabrication soit compétitif par rapport à d'autres solutions.

La forme géométrique du dépôt, réalisé par le procédé de fabrication directe par laser, est une caractéristique importante à maîtriser tout comme la microstructure, les contraintes et les porosités. La maîtrise du procédé d'élaboration passe aussi par un bon choix des paramètres d'entrée du procédé (stratégie de balayage, puissance, débit,…. etc). Or, il est souvent difficile de prédire et maîtriser tous ces paramètres, car celui-ci met en jeu plusieurs mécanismes (la mécanique, la métallurgie et la thermique) et de nombreuses interactions existent entre chaque mécanisme. De plus, la maîtrise du procédé, est rendue difficile par de nombreuses perturbations d'origines diverses, dont celles engendrées par des instabilités du procédé. Ce sont des éléments qui limitent la fiabilité du procédé.

De par ces difficultés, les industriels ont aujourd'hui souvent recours à des approches empiriques pour la mise au point du procédé. Ces approches sont basées sur des études paramétriques post mortem pour le calcul des paramètres optimaux de réglage en termes de rendement et de stabilité de construction. Ces méthodes nécessitent la réalisation de nombreux essais qui augmentent le coût de fabrication des pièces et qui ont le désavantage de n'apporter aucune information directe de la sensibilité des paramètres procédés sur la qualité de la pièce finale. Ainsi à chaque nouvelle pièce ou un nouveau matériau il est nécessaire de reproduire toute la démarche de validation.

Dans cette thèse, on se propose d'apporter une vision plus amont du procédé, notamment pour ce qui concerne l'instrumentation. Cette démarche doit permettre aux industriels d'avoir une meilleure connaissance des phénomènes qui sont mis en jeu lors du procédé, et ainsi d'améliorer leurs démarches de conception. En effet, l'instrumentation du procédé à un rôle clef dans un développement d'une nouvelle pièce, car elle permet non seulement d'acquérir des informations sur l'évolution des paramètres clés du procédé, mais aussi de connaître l'influence de ces paramètres sur la qualité de la pièce produite. Ces informations mesurées en temps réel sont une source de données pour de nombreuses applications de ce procédé. Elles peuvent permettre de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu lors de l'élaboration, en comparant les données expérimentales aux modèles numériques actuels et/ou de caractériser des paramètres procédés en cycle de production. Cette

[1] Source : AFPR (Association Française de Prototypage Rapide)

démarche permet donc à court terme d'avoir une meilleure connaissance, et de développer des outils permettant aux industriels d'améliorer et faciliter le processus de développement de pièces complexes. L'instrumentation est aussi une première étape vers le développement d'un contrôle procédé, équipé d'un système de commande automatique permettant d'adapter les paramètres procédés en cours d'élaboration, afin de garantir une bonne qualité finale des pièces fabriqués, notamment sur leurs caractéristiques géométriques, métallurgiques et mécaniques.

A ce titre, cette thèse s'inscrit dans un projet national labellisé FALAFEL (**F**abrication **A**dditive par **LA**ser et **F**aisceau d'**EL**ectrons) par le Fonds Unique Interministérielle (FUI), fédérant des acteurs de premier rang dans le secteur aéronautique, et des laboratoires de recherche travaillant sur des problématiques liées à la fabrication additive et aux matériaux. Cette collaboration avec les partenaires a suscité un échange scientifique et technique, qui a permis de développer des solutions techniques visant à améliorer le procédé de projection laser.

Dans cette étude, nous avons travaillé sur l'instrumentation du procédé de projection laser, dans le but d'acquérir des informations clefs du bain liquide (qui est notre outil de construction de la géométrie de la pièce) et par l'intermédiaire du contrôle procédé, d'avoir un système de commande temps réel permettant d'obtenir et de maintenir une haute qualité de la pièce fabriquée en matériaux métalliques en TA6V. Une attention toute particulière a été portée sur la définition d'une méthodologie permettant d'instrumenter ce procédé dans des conditions quasi industrielles, en vue de sa mise en place pour des applications industrielles. Cette méthodologie comprend notamment le choix de capteurs permettant de suivre des paramètres clefs lors de la fabrication, mais aussi des solutions et outils indispensables pour respectivement l'insertion des capteurs et le traitement des données issues de ceux-ci.

Des systèmes de mesures à base de caméras ont été utilisés pour mesurer de nombreuses grandeurs physiques dont la température et les dimensions du bain. Ces systèmes ont fait l'objet d'une étude en vue de minimiser les coûts. De plus, nous avons apporté des solutions sur l'insertion et le positionnement de ces capteurs, permettant d'une part, de résister au milieu hostile qui est le procédé de projection laser, mais aussi de garantir les spécifications du procédé, notamment la résolution (liée à la taille du bain liquide et à la largeur du champ de vision), de dynamique, de fiabilité et de la connectivité de l'installation.

L'identification d'un modèle dynamique pour le contrôle commande du procédé de projection laser ont été réalisées, à partir des méthodes couramment utilisées dans l'identification des procédés industriels. Une approche de modélisation de type boite noire a été mise en place sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du procédé. Ces résultats ont été complétés par une approche multivariables du procédé pour l'analyse des interactions entre les paramètres. Ces modèles ont été appliqués aux différents points de fonctionnement définis en fonction d'un certain nombre de critères pour le démonstrateur de laboratoire. Les sorties issues des modèles ont été comparées aux données expérimentales, afin de valider à la fois la méthodologie d'identification des modèles et d'instrumentation.

La faisabilité d'un contrôle commande a été évaluée sur différentes géométries de pièces. Le contrôle procédé a permis notamment d'évaluer l'influence des perturbations et des variations dans les conditions de fabrication sur la qualité de la pièce finale, en comparaison avec une pièce fabriquée sans contrôle procédé.

Ma principale contribution concerne donc le développement d'une solution technologique (matérielle et algorithmique) pour la mise en place d'une instrumentation maîtrisée en milieu industriel permettant de répondre favorablement aux applications visées par le projet FALAFEL. Cette instrumentation a permis la mise en œuvre de méthodes innovantes, utilisant des outils de l'automatique moderne, pour commander le procédé de projection laser.

Ce manuscrit est organisé de façon à refléter la démarche ayant permis d'aboutir au système fonctionnel existant :

Le chapitre 1 a pour but de montrer la nécessité du contrôle de procédé de projection laser en définissant l'influence des paramètres clefs sur les propriétés de la pièce, les enjeux, les contraintes et la problématique de commande.

Le chapitre 2 est consacré au développement des capteurs de cette étude. Nous présenterons alors les capteurs et les techniques de mesures utilisées pour le contrôle/commande du procédé de projection laser. Nous préciserons alors ceux que nous avons retenus dans le cadre de l'étude, avec leurs montages associés.

Le chapitre 3 décrit la méthodologie d'identification des modèles qui ont conduit à la réalisation du système de contrôle procédé.

Le chapitre 4 présente le développement et la validation du contrôle procédé proprement dit.

Chapitre I

Projection laser et contrôle de procédé

I.1 Introduction

La complexité du procédé de projection laser rend difficile sa compréhension et son optimisation. La plus grande difficulté réside dans le fait que la fabrication de pièce met en jeu plusieurs mécanismes (la mécanique, la métallurgie et la thermique) et de nombreuses interactions existent entre chaque mécanisme. Ces interactions vont déterminer la qualité et les performances mécaniques d'une pièce fabriquée par projection laser [1], d'où cette nécessité de maîtriser le procédé de fabrication. Son contrôle dépend de nombreuses variables qui sont souvent interdépendantes. Dès lors il est nécessaire de mettre en place des plans expérimentaux pour acquérir des connaissances sur les mécanismes mis en jeux et les paramètres clefs qui permettent de maîtriser le procédé [2].

L'utilisation d'une instrumentation spécifique peut contribuer à la compréhension des mécanismes physiques qui ont lieu au cours de procédé, en permettant l'accès à des caractéristiques (in situ) de la pièce projetée, en temps réel pendant l'élaboration. On peut ainsi surveiller l'état de pièces projetées, voire même corriger les défauts lors de la fabrication, en ayant un suivi et un contrôle du procédé en temps réel.

Ce chapitre a pour but de montrer la nécessité du contrôle de procédé de projection laser en définissant l'influence des paramètres clefs sur les propriétés de la pièce, les enjeux, les contraintes et la problématique de commande.

I.2 Le procédé de projection laser

I.2.1 Principe de fonctionnement

Le procédé de projection laser (Direct Metal Deposition, DMD) appartient à la famille des procédés de fabrication additive, par opposition aux méthodes de fabrication classique comme l'usinage, où l'on soustrait de la matière pour obtenir la pièce finale. Cette technique de production permet de réaliser des objets à géométrie complexe à partir de poudres métalliques ou d'alliages.

Le schéma de principe du dispositif DMD est proposé sur la Figure I.1. La première étape lors de la fabrication de pièce par le procédé de projection laser est la représentation de la pièce à réaliser en un modèle en trois dimensions en conception assistée par ordinateur (CAO), généralement au format STL (STereoLithography file) qui constitue le standard en la matière. Ce modèle est tranché en sections 2D par un programme informatique adapté. La pièce est ainsi construite couches par couches à partir des donnés du modèle CAO par ajout de matière.

Le matériau d'apport sous forme de poudre[2] est injecté via une buse adaptée dans un bain de métal en fusion (ou *bain liquide*) formé par l'interaction laser-substrat. La résultante de cet apport de matière et du déplacement du faisceau laser est la formation d'un cordon de matière solide et densifié de hauteur Δh. Les déplacements sont commandés numériquement afin de recomposer couche après couche la géométrie issue du fichier CAO de la pièce. Selon les dispositifs, chaque couche est déposée par déplacement soit de la table XY sur laquelle est fixé le substrat, soit de la buse elle-même (Figure I.1).

[2] La poudre est généralement produite par atomisation par voie gazeuse ou liquide du métal en fusion, et la taille des particules obtenues est de quelques dizaines à plusieurs centaines de microns.

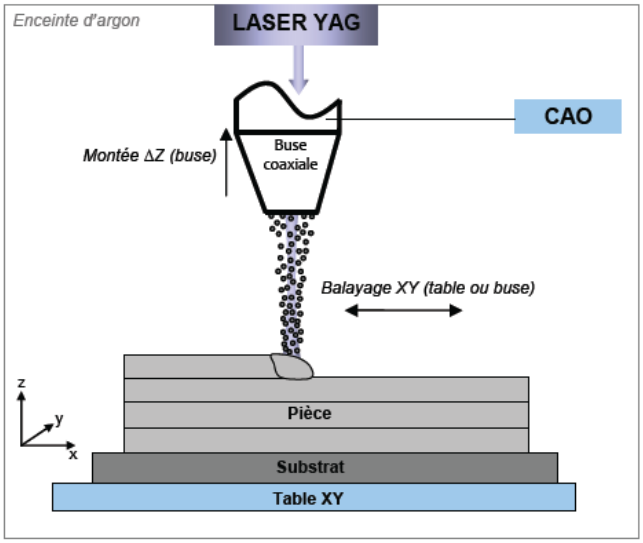


Figure I.1 – Schéma de principe du procédé de projection laser [3]

I.2.2 Paramètres du procédé

Le contrôle de procédé de projection laser réside en un choix des paramètres opératoires garantissant une bonne qualité finale des pièces fabriqués, notamment sur leurs caractéristiques géométriques (dimensionnelles et topographiques), métallurgiques, mécaniques et aux critères économiques du procédé ainsi qu'à l'état de surface. La Figure I.2 résume l'ensemble de ces paramètres regroupés en *paramètres d'entrées* (inputs), *paramètres de sorties* (outputs) et les phénomènes physiques mis en jeu. Les phénomènes physiques intervenant dans le procédé seront expliqué dans le Chapitre III (Cf. §III.2.1).

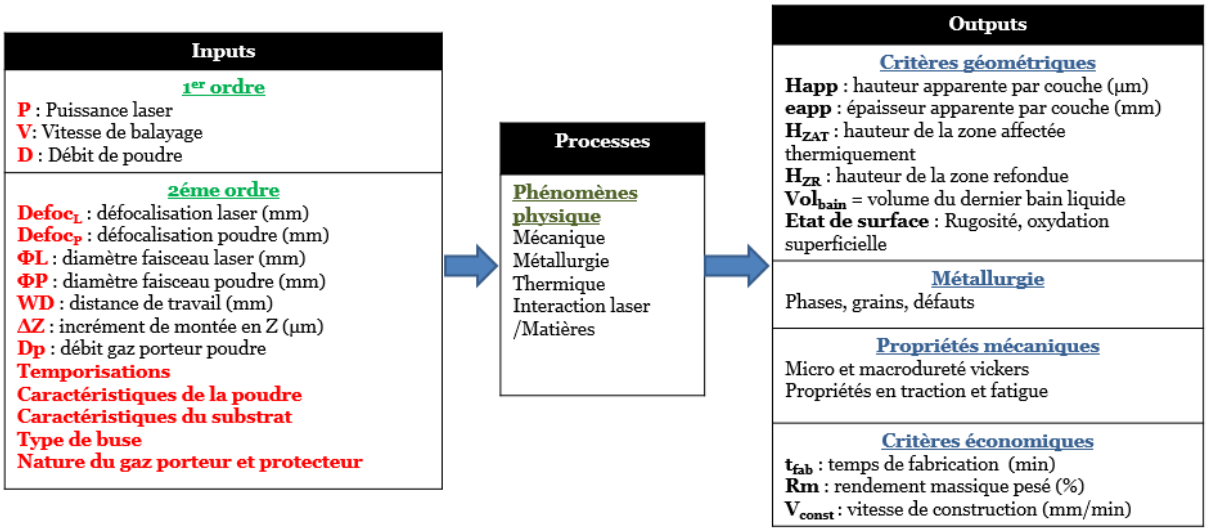


Figure I.2 – Paramètres d'entrée, de sortie et phénomènes physiques du procédé de projection laser [3]

La Figure I.2 regroupe les observables qui sont généralement étudiés pour identifier les effets des paramètres d'entrées. En général, on recherche les variables à mesurer et les corrélations entre les variables d'entrées et la qualité de la construction de la pièce produite.

D'un point de vue automatique, il s'agit d'un système dont les principales entrées sont la puissance du laser, la vitesse de déplacement par rapport au substrat, et le débit de poudre (paramètres du 1er ordre). D'autres paramètres tels que les paramètres du 2ème ordre peuvent également être des

paramètres critiques dans le cadre de l'optimisation d'un procédé. D'un autre côté, les paramètres de sorties sont ceux qui caractérisent la qualité finale de la pièce fabriquée. Dans ce qui suit certains des principaux paramètres sont expliqués. Le choix des entrées-sorties pour le contrôle procédé seront expliqués dans le §I.4.3.

Caractéristiques géométriques d'un cordon

La forme géométrique du dépôt réalisé par le procédé de projection laser, est une caractéristique importante à *contrôler* tout comme la microstructure [4]. C'est un indicateur de qualité de dépôt. La Figure I.3 représente un schéma en coupe d'un dépôt sur substrat massif. Les grandeurs géométriques relatives à un cordon sont d'une part les dimensions du cordon H_{app}, e_{app} et S_{app} (surface apparente du cordon) et d'autre part les dimensions de la zone refondue H_{zr} (hauteur de zone refondue) et e_{zr} (épaisseur de zone refondue) ainsi que les dimensions de la hauteur de Zone Affectée Thermiquement H_{zat} et e_{zat} (épaisseur de ZAT). L'angle de contact θ (appelé également : angle de mouillage) entre le cordon et le substrat est également caractérisé[3].

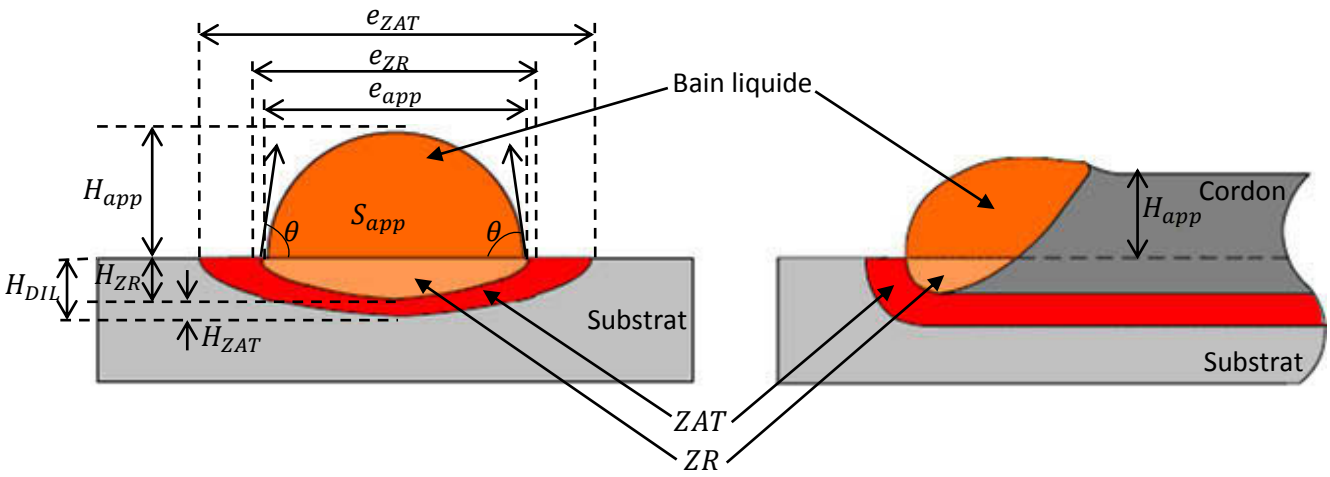


Figure I.3 – Caractéristiques géométriques d'un cordon déposé sur un substrat (vue en coupe) [5]

Dilution

La hauteur totale de la zone du substrat affectée par la déposition du cordon (H_{zr}+H_{zat}) est nommée hauteur de dilution H_{Dil} (Figure I.3). Le taux de refusions D% traduisant l'amplitude de la zone refondue entre le cordon et le substrat peut s'exprimer ainsi [4] :

$$D\% = \frac{H_{ZR}}{H_{ZR} + H_{app}} \qquad \text{(I.1)}$$

Etat de surface

L'état de surface (ou rugosité) des objets élabores par le procédé de projection laser présente des irrégularités comme le montre la Figure I.4. La superposition des dépôts est à l'origine des ménisques périodiques sur la surface latérale de la pièce fabriquée. Typiquement, l'amplitude des ondulations peut varier de l'ordre de 50µm à 500µm selon les paramètres opératoires. En plus de ces ménisques latéraux, les surfaces présentent une *rugosité* que l'on doit aux particules de poudre qui n'ont pas

[3] La valeur de l'angle θ influe sur la *qualité du recouvrement* entre cordons, c'est-à-dire sur le manque de matière qui peut éventuellement subsister lors de la juxtaposition de deux cordons successifs dans la direction Y (X étant la direction de balayage). Il semble que cet angle doit être inférieur à 80° pour assurer un recouvrement correct [5].

intégré le bain liquide et qui par conséquent peuvent adhérer à la surface latérale du mur ou les bandes de solidification (fluctuation des zones fondues en cours du procédé) [6], comme le fait apparaître la vue détaillée de la Figure I.4. L'état d'oxydation de la surface influe également sur la rugosité du mur (MAISONNEUVE 2008).

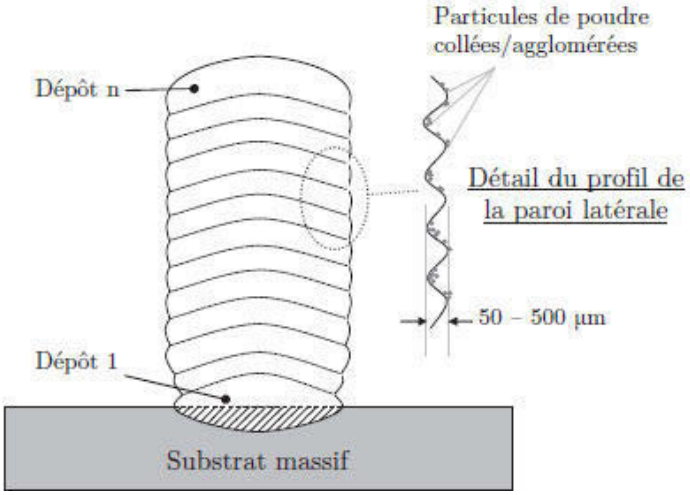


Figure I.4 – Schéma en coupe transversale d'un mur mince [7]

I.3 Modèles phénoménologiques

Il est important de comprendre et *modéliser l'influence des paramètres d'entrées sur les paramètres de sortie* au travers du processus (le système que l'on cherche à modéliser). Avant sa modélisation au sens Automatique, que nous verrons plus tard, de très nombreuses études (expérimentales, analytiques et numériques) ont été réalisées à ce sujet. Nous présentons rapidement des références intéressantes pour le lecteur : [6] traite d'une manière originale le lien entre les différents paramètres opératoires du procédé de projection laser et l'état de surface final des pièces fabriquées. [8], discutent des effets des paramètres opératoires (puissance, vitesse et débit) et de leur effets sur la forme du dépôt (Hauteur, largeur et dilution) pour le cas d'une poudre Ti-6Al-4V. Des lois empiriques et un modèle mathématique ont été calculés reliant la forme du dépôt aux paramètres opératoires. On trouve une étude similaire dans [9] sur un alliage à base nickel chrome, en incorporant dans son modèle l'angle de mouillage. Ils présentent notamment des domaines pour lequel les cordons réalisés ne se forment pas ou de mauvaises qualités. [10] présente un modèle pour la détermination de la géométrie de dépôt dans le cas du rechargement laser (laser cladding). Une corrélation entre la largeur du bain de fusion et la dilution a été trouvée. Des simulations ont été effectuées pour différentes combinaisons de vitesse, puissance laser et la température du substrat. Les résultats de simulation sont comparés aux résultats expérimentaux, montrant un très bon accord entre les deux. [11] a développé un modèle analytique simplifié du procédé de projection laser. Ce modèle étudie les relations existantes entre la vitesse du déplacement, la quantité de poudre arrivant dans le bain et les dimensions du bain (largeur et pénétration).

Un des travaux importants est celui réalisé par [5] dans le projet PROFIL. Elle a travaillé sur des cordons et des murs. Elle en a déduit un modèle phénoménologique (Figure I.5) sur un très grand nombre d'expérimentation, permettant d'établir des corrélations entre les paramètres du 1er ordre et la morphologie du bain liquide (longueur de bain et hauteur du bain) :

- La largeur du cordon (équivalente à la largeur du bain liquide) dépend de la puissance laser (P) et de la vitesse d'avance (V). Le rapport entre ces deux termes définit *l'énergie linéique*

(P/V)[4]. La puissance laser influe sur la densité énergétique de la tâche laser et sur la quantité d'énergie absorbée par les poudres et le substrat. Pour des puissances faibles, étant donné que la densité d'énergie du faisceau laser est de type gaussien (Cf. Figure II.23), la largeur du bain formé sur le substrat est inférieure au diamètre du faisceau laser (d) car les bords du faisceau n'apportent pas suffisamment d'énergie pour fondre le matériau. A mesure que la puissance augmente, la largeur du bain et donc l'épaisseur des cordons eapp croissent. *L'épaisseur du cordon eapp varie quasiment linéairement en fonction de la puissance*. La vitesse de balayage V influe sur le temps d'interaction du bain avec le laser (d/V). Ainsi, pour des vitesses de balayage faibles, le temps d'interaction est relativement long. L'énergie absorbée par le substrat est grande, ce qui provoque la formation d'un bain liquide de taille importante et donc une épaisseur de cordon eapp conséquente. L'augmentation de la vitesse de balayage va par conséquent conduire à la diminution de la taille du bain et donc de eapp, Happ et Sapp. Le débit massique de poudre (Dm) et la vitesse de balayage V influent sur eapp chacun de façon identique : *eapp diminue de façon non linéaire avec l'augmentation de V et croît légèrement avec l'augmentation de Dm.*

- La hauteur du cordon déposé dépend essentiellement de la surface d'interaction entre le bain liquide et le jet de poudre. *Elle est principalement pilotée par le débit massique de poudre D_m et la vitesse de déplacement V*. Cette hauteur augmente avec la *masse linéique* (D_m/V). Celle-ci conditionne en effet, la quantité de matière réellement apportée au bain liquide. La hauteur de dépôt est d'autant plus importante que le débit massique est grand. Elle augmente également avec une puissance élevée et une faible vitesse de déplacement, puisque ces deux paramètres contribuent à l'augmentation de la taille du bain en surface et donc à une meilleure interaction entre le bain liquide et le jet de poudre [7]. Par ailleurs, *la puissance laser ne modifie pas la hauteur du cordon.*

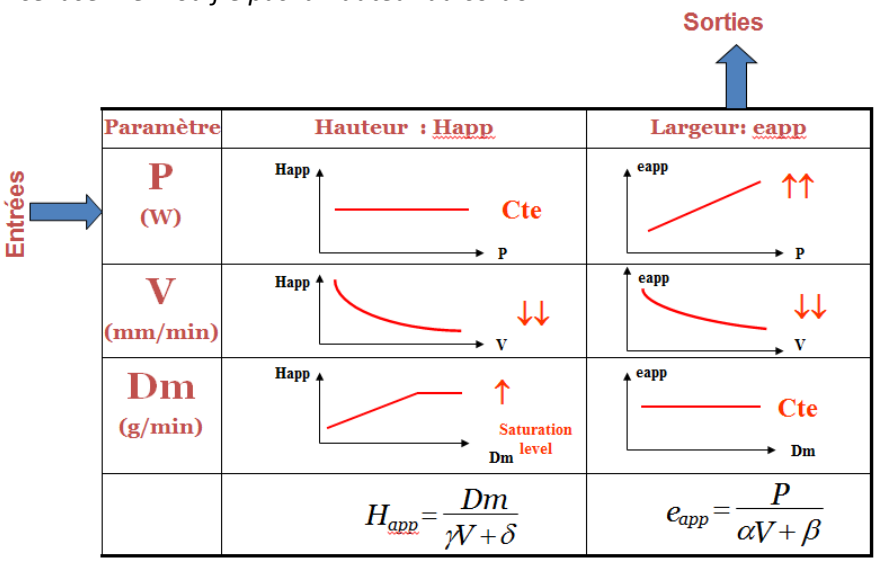


Figure I.5 – Modèle phénoménologique du procédé de projection laser [3]

Ces lois phénoménologiques permettent dans un premier temps d'orienter les études sur le choix des entrées–sorties pour l'instrumentation du procédé de projection laser (Cf. §I.4.3). Dans un second temps, de construire des cartographies du procédé où apparaissent les courbes d'iso-valeurs des paramètres de sortie en fonction des paramètres d'entrée. La Figure I.6 représente la cartographie du procédé de projection laser traduisant l'influence des paramètres P, V, Dm

[4] Cette grandeur caractérise la quantité d'énergie déposée par unité de longueur $(J.m^{-1})$.

(Ml=Dm/V) sur les caractéristiques géométriques du cordon (Happ, eapp, Sapp, Hdil)[5], le rendement massique géométrique Rmg[6] et la typologie du cordon[7] en TA6V [5].

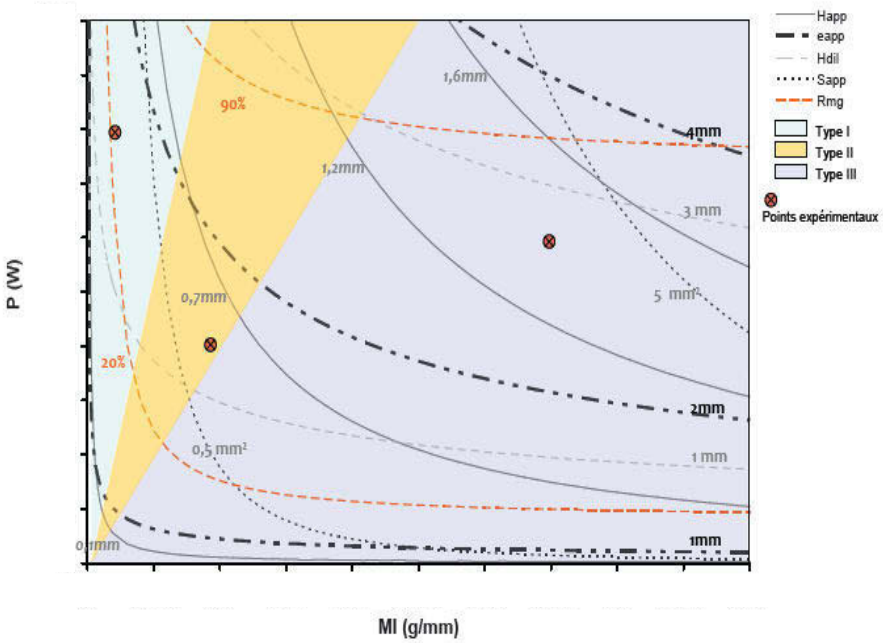


Figure I.6 – Cartographie du procédé de projection laser en TA6V dans le cas d'un cordon [5]

Il est à noter que ces cartographies permettent de sélectionner une fenêtre pour le choix des paramètres d'entrées (de commande) et des points de fonctionnement permettant d'obtenir des couches d'une certaine dimension (adaptées au tranchage CAO de la pièce) et une microstructure (phases) et macrostructure (grains) en adéquation avec les propriétés d'usage requises pour la pièce à construire(Cf. Chapitre III). Par contre, en pratique, l'exploitation de ces modèles est inadaptée à la synthèse d'une loi de commande, car ils sont en régime stationnaire et elles ne prennent pas en compte les dynamiques imposées par les variations sur les entrées. Pour la modélisation et le contrôle/commande, nous utilisons au chapitre III un modèle dépendant du temps (*modèle dynamique*). Néanmoins, ces cartographies sont adaptées à une géométrie bien particulière qui est le cordon ou le mur. Or, les stratégies employées pour la construction de pièces complexes peuvent induire des zones qui sont recuites de nombreuses fois du fait des passages successifs du laser, ce qui génère des différences de microstructures au sein de la pièce. En conséquence, ces cartographies ne seront pas toujours applicables à la construction de pièces réelles, en l'occurrence pour la prédiction des phases en présence [5].

I.4 Nécessité du contrôle de procédé en projection laser

Bien que la présente partie traite de l'automatique, il nous semble essentiel, avant d'aborder ce sujet de rappeler que l'automatique en tant que science fournit des méthodes et des outils

[5] La connaissance de Happ que génèrent les paramètres PVDm choisis permet de programmer convenablement l'incrément de montée de la buse ($\Delta Z = Happ$). Afin d'assurer un recouvrement optimal entre deux cordons constitutif du remplissage d'une zone de la pièce, la prévision de eapp et de la typologie du cordon permet la programmation adéquate de l'écart ΔY ou ΔX entre cordons successifs.

[6] Cette mesure a été déterminée à partir de la masse volumique du matériau et de la masse linéique :

$$Rmg = \frac{\rho . V . Happ . eapp}{Dm} = \rho . Sapp . (\frac{1}{Ml})$$

[7] L'angle de contact θ entre le cordon et le substrat (Cf. Figure I.3) permet de classifier les cordons selon trois morphologies: le type I pour un angle < 90 , type II pour un angle $\theta = 90$ et type III pour un angle $\theta > 90$

majoritairement informatiques, pour rétroagir sur un système et en corriger le fonctionnement conformément à des objectifs connus. Lorsque l'on s'intéresse au procédé de projection laser, la question se pose avant tout de savoir pourquoi on réalise l'automatisation, sur quoi et ensuite comment on le fera.

I.4.1 Principales caractéristiques du procédé pour le contrôle

Du point de vue de l'automatique, les procédés de projection laser sont caractérisés comme des systèmes *multivariables* (plusieurs entrées et plusieurs sorties), *non-linéaires*, *non-stationnaires* et présentent des couplages (des *interactions*) entre les variables entrées-sorties du procédé [12] [13].

De fait, la modélisation numérique de ces systèmes est extrêmement complexe et se heurte à trois difficultés principales : la prise en compte d'une interface mobile en présence d'écoulement, la gestion des contrastes à l'interface liquide/solide et les couplages multiphysiques[8]. De plus, des imprécisions des mesures peuvent entraîner des difficultés lors de la phase de validation de ces modèles [14] dont les propriétés thermophysiques du matériau peuvent avoir évolué au cours du temps [15] [16]. Ces variations peuvent être la conséquence de changements de la thermique ou encore des instabilités non prévisibles et inobservables d'un point de vue macroscopique. Il en résulte que *la modélisation mathématique de ces procédés est une tâche difficile et comme ces modèles sont centraux au développement de systèmes de commande, donc la commande en ligne à base de modèle devient elle aussi complexe*.

Une seconde difficulté majeure est les *difficultés de mesure des variables clef* du procédé lors de la fabrication de pièce. C'est bien là que se trouve la principale limitation retardant l'instrumentation et l'automatisation complète du procédé. En effet, la plupart des variables qui caractérise la qualité de la pièce, ne sont pas toujours accessibles en temps réel. Certaines ne sont mesurables que sur des coupes métallographiques ou d'essais mécaniques, dont la durée, les coûts et surtout le mode opératoire (mise en œuvre complexe, technique lourde) limitent la fréquence et l'automatisation des mesures, conduisant à un allongement des cycles de fabrication. C'est ainsi que dans la plupart des installations existantes, l'opérateur procède par *essais-erreurs* et typiquement, une analyse visuelle indiquera a posteriori les corrections à imposer aux paramètres, telles que la montée en Z, les débits, etc. Cependant, le problème des capteurs a reçu une attention de plus en plus importante au cours de ces années. Malgré cela, même si un effort important a été fait au niveau des centres de recherche pour développer et fiabiliser des capteurs, le transfert de ces derniers vers l'industrie reste naissant et doit encore se développer dans les années à venir.

Nous reviendrons plus en détails sur ces caractéristiques au chapitre III sur la modélisation et le chapitre II sur la mise en pratique des capteurs.

I.4.2 Défauts et instabilités du procédé de projection laser

Il est nécessaire avant d'aborder le problème du contrôle/commande d'avoir une bonne vision des défauts et instabilités du procédé de projection laser, afin de mettre en œuvre les bons outils et de traiter les problèmes avec des méthodes adaptées que nous allons considérer plus avant. En effet, les difficultés que l'on peut rencontrer lors du procédé de projection laser apparaissent essentiellement lors de la fabrication de pièces et qui est confrontée aux *problèmes d'instabilités du procédé*. Celles-ci, dont certaines sont détectables visuellement, sont génératrices de *défauts*, qui, selon leur répartition et leur taille, risquent d'engendrer des *non conformités* et de détériorer les caractéristiques mécaniques des pièces. Du fait de la multitude de paramètres intervenant dans le procédé, la reproductibilité même des propriétés des pièces créées est difficile.

[8] Pour une revue bibliographique sur les différentes techniques permettant la prise en compte de ces contraintes, le lecteur est encouragé à se référer à [7] [120][121].

A. Perturbations

Les instabilités du procédé de projection laser sont dues à des perturbations d'origines diverses :

- La qualité du faisceau laser est affectée par les fluctuations de la source laser. Celles-ci s'observent au niveau de la puissance et de la répartition d'énergie. Les distorsions de la chaine optique (système de lentilles) et des miroirs de mise en forme entrainent aussi des *perturbations sur le faisceau*, mais également les poussières, les fumées et les particules en suspension qui peuvent encrasser l'optique. Viennent s'ajouter à cet effet les pertes dans la chaîne optique qui dépendent des propriétés et de la propreté des optiques utilisés. Les variations des autres paramètres (pressions des gaz, état de la source de pompage, géométrie de la cavité optique, …etc) sont aussi considérées comme du bruit ou des perturbations.
- Des *variations sur le débit massique* de poudre et sur la protection gazeuse, notamment la pression, peuvent être gênantes, cela peut conduire à laisser entrer de l'oxygène, entrainant la contamination et *l'oxydation* des pièces. La valeur de l'absorption peut augmenter ou diminuer avec l'oxydation.
- Des variations peuvent être introduites volontairement par le procédé. Cela peut être *une variation de la vitesse* imposée par la commande numérique (la gestion des trajectoires, l'accélération ou la décélération au passage des points de rebroussement,…etc). On est amené également à considérer des fonctions de robotique. On y trouve autant de problèmes de mécanique que de commande, surtout dans la configuration 5 axes. Le procédé peut comporter intrinsèquement des effets perturbants, tels que les *convections* introduisant des mouvements dans le bain [6]. Il convient aussi de ne pas oublier les perturbations sur des pièces présentant des changements dans leur géométrie (*défauts géométriques*). Ces défauts peuvent être des rainures ou des trous dans la pièce (par exemple la présence de conduites de refroidissement dans des cylindres de moteurs). Ils imposent des perturbations thermiques importantes et/ou une désadaptation dans les conditions de travail (défocalisations poudre et laser, distance de travail,….etc)

Bien entendu, beaucoup de ces perturbations sont difficiles à prendre en compte dès la conception de la machine et certaines variations sont inhérentes au procédé (variation de la vitesse notamment). Ces éléments, on peut les prendre en considération soit en connaissance et faire une commande prédictive sur la vitesse, soit on peut les considérer dans un premier temps comme des perturbations. C'est dans ce contexte que le contrôle/commande prend tout son intérêt : Il s'agit de corriger, en temps réel, le procédé pour *garantir un fonctionnement répétable et rejeter les effets de ces perturbations.*

B. Défauts géométriques : Instabilités des dimensions du cordon

- A partir du modèle phénoménologique présentés plus haut, on a montré que la largeur et, surtout, la hauteur du cordon de matière peuvent varier lors de la construction en fonction des paramètres opératoires et des conditions externes (perturbations, température du substrat, …etc). Or, lors de la construction de pièces par le procédé de projection laser, ce dernier peut présenter une certaine stabilité, qui peut permettre de construire des structures de grande hauteur sans contrôle de procédé, alors que la précision de réglage des paramètres ne peut pas en principe arriver à ce type de précision (quelques dixièmes de millimètres après des centaines de couches). Cela peut s'expliquer par le fait que sous certaines conditions, le procédé atténue naturellement l'effet de ces perturbations (le procédé montre une *autorégulation partielle*). Nous reviendrons dans le chapitre II (§ II.4.1.3) sur ce mécanisme d'auto régulation et dont nous avons mis au point un moyen permettant de mettre en évidence les conditions auxquelles le processus peut s'inverser et le défaut ne peut alors que s'accroitre.
- *Les états de surfaces* peuvent donner lieu à des fortes rugosités lorsqu'elles sont mal maîtrisées. Cette rugosité est liée d'une part à la forme du bain liquide qui laissera un ménisque plus ou moins convexe sur la surface latérale du mur et d'autre part à la quantité de particules de poudre

qui n'ont pas intégré le bain liquide et qui par conséquent peuvent adhérer à la surface latérale du mur (Figure I.4). La solution utilisée actuellement pour obtenir une pièce ayant une bonne santé matière, qui respecte les cotes et le fini de surface est d'ajouter une surépaisseur au niveau de ses cotes. Ce choix de construction implique nécessairement une étape d'usinage de finition de manière à obtenir les cotes et un état de surface acceptable. Une autre solution envisageable pour obtenir des meilleurs états de surfaces et une meilleure précision géométrique est *la maîtrise des zones fondues (largeur et hauteur par couche)* [6].

C. Autres instabilités ou défauts

Le procédé de projection laser met en jeux de nombreux phénomènes physiques, qui rendent le système très complexe lorsqu'ils interagissent simultanément. Lorsque ces phénomènes ne sont pas maîtrisés cela conduit généralement à des pièces défectueuses, qui peuvent représenter un coût en post traitement non négligeable selon la complexité de la pièce. On retrouve principalement plusieurs types de problématiques lors de la fabrication de pièces par projection laser :

- Les porosités : résultent principalement des cavités laissées lors de la solidification (formation de bulles de gaz dans le cordon) ou bien des défauts de mise en couche (un taux de recouvrement entre cordons mal adapté) [5]. Ces porosités nuisent aux performances mécaniques de la pièce. Afin de *réduire les porosités* dû à des instabilités du procédé lui-même et des recouvrements entre cordons, il devient incontournable de *contrôler les dimensions du bain liquide*. En effet, en contrôlant le bain liquide, on va mieux contrôler le recouvrement entre les cordons (et donc on va diminuer le risque de mauvais recouvrement) et donc de formation de porosités. Dans le cas de l'alliage de Colmonoy, Steen [17] a montré expérimentalement que si le rapport de la largeur du cordon à sa hauteur reste supérieur à 5, ce problème peut être résolu (Voir Figure I.7.B).
- Problèmes métallurgiques : un chauffage intense de la pièce peut provoquer de forts gradients thermiques. Les cycles thermiques induits par le procédé au sein de la pièce conduisent à des déformations locales entrainant des déformations de la pièce et des contraintes résiduelles à l'origine de l'apparition des fissures [18]. Une solution pour les éviter est de préchauffer la pièce à traiter afin d'éviter un refroidissement brusque ou bien contrôler le processus de solidification (par le contrôle du gradient thermique et de la vitesse de solidification) afin d'assurer la microstructure demandée partout dans la pièce qui sera construite. Ceci exige une *modélisation de la thermo-mécano-métallurgie du procédé* au cours de la fabrication et des mesures de température tout au long du processus [1]. Ceci sort donc clairement du cadre d'un contrôle de procédé en ligne par mesure d'informations sur le processus (au moins pour le moment). De plus, on montrera dans le Chapitre II que *les variations des dimensions du bain liquide sont en partie le reflet des variations de l'environnement thermique et que, donc, leur contrôle peut contribuer au contrôle de la microstructure*.

I.4.3 Définition des entrées-sorties pour le contrôle procédé

Deux étapes précèdent la conception et l'installation d'un système de contrôle-commande pour le procédé de projection laser :

1. le choix des variables à mesurer ou les *observables* (sorties) pour l'observation des grandeurs du procédé que l'on désire maîtriser et des variables de commandes (ou *entrées de commande*) qui sont les variables du procédé qui sont manipulables par des actionneurs pour l'affranchir des perturbations. Elles ont un effet réel sur le procédé et notamment sur les observables;
2. la *définition des capteurs* et *actionneurs* requis pour observer et contrôler le comportement du procédé.

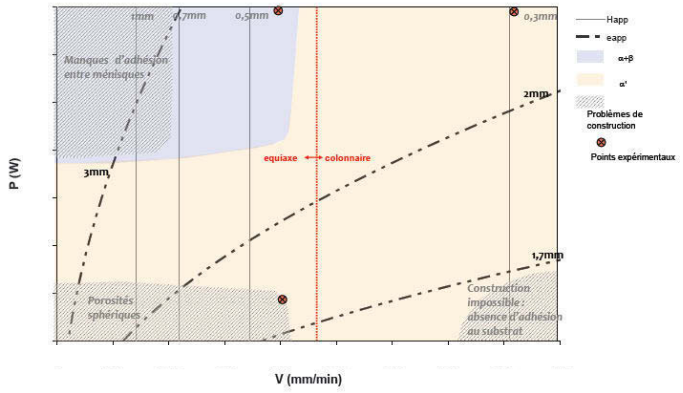
Le nombre de grandeurs qui sont a priori intéressantes et doivent être mesurées par des capteurs est important pour le procédé de projection laser. Les propriétés qui caractérisent la qualité finale des

pièces fabriquées[9] sont en effet très nombreuses (Cf. I.2.2). Ces propriétés peuvent être classées en trois domaines :

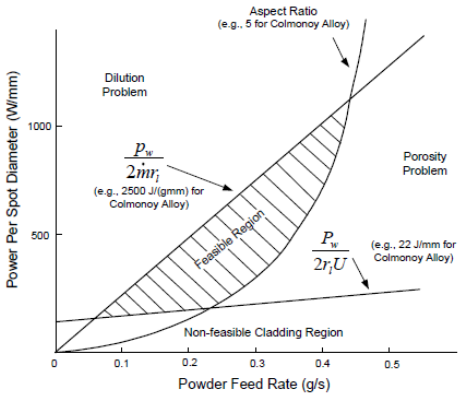
- Les propriétés *dimensionnelles* : dimension du cordon, dilution, rugosités,…
- Les propriétés *métallurgiques* : gradients thermiques, vitesse de chauffage et vitesse de refroidissement, …
- Les propriétés *mécaniques* : dureté, contraintes résiduelles, ….

Si la solution qui consiste à mesurer les propriétés métallurgiques et mécaniques est séduisante, elle nécessite l'utilisation des modèles analytiques, couplés aux mesures de nombreux paramètres directement ou indirectement reliés à ces propriétés. Comme nous l'avons souligné dans la partie précédente, cette démarche est *longue*, souvent *difficile*, et elle nécessite des technologies très variées et des compétences très *pluridisciplinaires*. Il existe également quelques risques quant à l'évaluation de la qualité de ces propriétés, qui dépend du degré de confiance dans le modèle, dans les mesures, dans les paramètres du modèle et dans l'absence de perturbations (Cf. §III.2.1).

L'instrumentation d'un procédé est un problème qui doit être bien posé avant de tenter de le résoudre. Il faut étudier avant tout quelle est la mesure pertinente à réaliser. L'analyse du procédé, sur la base des cartographies de procédé, propose des démarches appropriées à ce type de problème. Sur ces cartographies sont généralement représentées les courbes d'iso-valeurs des dimensions du cordon (Hauteur et Largeur), les zones où la construction présente des défauts tels que des fissures, des manques d'adhésion entre couches ou des porosités, les plages paramétriques où la dilution est accrue, la microstructure est majoritairement $\alpha + \beta$ ou bien $\acute{\alpha}$ et enfin la frontière de part et d'autre de laquelle la construction présentent des grains colonnaires ou équiaxes [19] [5] [13] [17]. Citons comme exemple les résultats de [5] sur un mur 2D en Ti-6Al-4V[10] (Figure I.7.A) et ceux de Steen [17] sur l'alliage de Colmonoy (Figure I.7.B).



A : [5]



B : [17][11]

Figure I.7 – Cartographie du procédé de projection laser

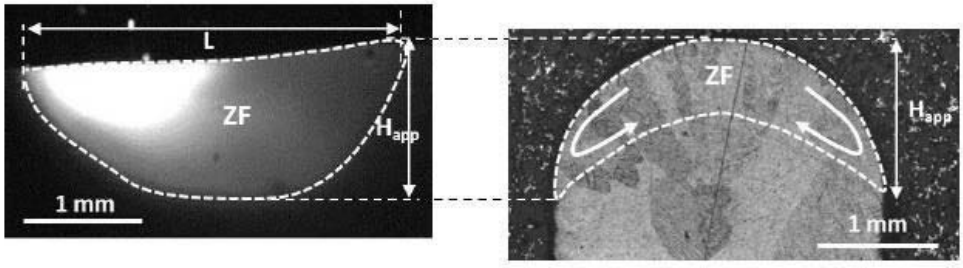
Cette étude nous permet de comprendre que le contrôle du procédé réside dans la parfaite *maîtrise du bain liquide* qui est notre *outil de construction de la géométrie de la pièce* et qui est le *reflet de certaines propriétés du bain liquide* et après solidification du cordon de matière (Figure I.8). La première grandeur qu'il convient de contrôler est la *hauteur du bain*. De même une valeur minimum

[9] Nous pouvons retenir la définition de la qualité d'un produit telle qu'elle est présentée dans la norme ISO 8402 : "L'ensemble des caractéristiques du produit qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites".

[10] L'intérêt de cette carte est de connaître par avance les caractéristiques géométriques et métallurgiques de la pièce (en l'occurrence ici le mur) en fonction des paramètres d'entrée choisis.

[11] Aspect Ratio (représente le rapport de la largeur du cordon à sa hauteur), P_w (la puissance), r_l (rayon du faisceau), U (Vitesse) et $\dot{m}$ le débit massique.

de la *largeur du bain* est généralement imposée. Une proportion même très faible de certaines impuretés en addition peut exalter ou altérer les proportions mécaniques d'un alliage. Les dimensions du bain imposent ainsi le pourcentage de dilution et interviennent ainsi dans la qualité du matériau finale (DEROUET, 1996).



(a) (b)

Figure I.8 – Caractéristiques géométriques du bain liquide : (a) Vue latérale du bain liquide d'un alliage de Ti-6Al-4V, (b) Coupe métallurgique sur un mur solidifié [6]

Il en ressort aussi de l'étude sur les cartographies de procédé (et le modèle phénoménologique) que la puissance laser, la vitesse de déplacement et le débit massique de poudre (paramètres du 1er ordre) sont les trois principales entrées de commande à agir sur la géométrie du bain liquide. D'autres paramètres tels que les paramètres du 2ème ordre (la distance de focalisation du faisceau laser et le faisceau de poudre, la distance de travail,….etc) peuvent également être des paramètres de commande, mais ils sont difficilement commandable et de plus ils sont très déterminant par rapport à la taille du cordon. Les valeurs des paramètres du 2ème ordre sont spécifiées pour une configuration de travail optimale en tenant compte des spécificités du procédé en termes de rendement du procédé et de stabilité de construction.

Ainsi, la synthèse du contrôleur pour le procédé de projection laser est multivariable : le contrôleur doit réguler la hauteur (pour s'assurer de la parfaite cohérence entre la construction réelle et la trajectoire de la buse) et de la largeur (afin d'obtenir et de maintenir une haute qualité de la pièce fabriquée). Les valeurs des consignes de référence sont spécifiées en tenant compte des spécificités du procédé. Les entrées de commande sont la puissance laser et la vitesse de déplacement de la pièce. Une autre possibilité serait la régulation du débit de poudre, mais dans un premier temps on ne peut pas le faire par ce que le système d'apport de poudre (comportant un mélangeur, un distributeur et des tuyaux d'alimentation), à un temps de réaction assez lent.

La mesure et la manipulation de tous ces paramètres reposent sur une instrumentation complète du procédé. Nous y reviendrons en détails dans le chapitre II en justifiant nos choix de capteurs, pour mesurer les signaux caractéristiques produits par le bain liquide pour le contrôle/commande du procédé.

I.4.4 Traçabilité versus contrôle-commande

Tracer le procédé, consiste à mesurer un ensemble de signaux provenant du procédé lors de la fabrication des pièces : les entrées du procédé (mesures de la puissance laser, de la vitesse d'avance, …etc) et les sorties (géométrie du bain, environnement thermique,…etc) par des capteurs adaptés[12]. L'ensemble est sauvegardé et peut même être utilisé afin de surveillance (ou de *monitoring*) pour détecter des dérives éventuelles du procédé, voire même interrompre le processus en cas de défaut identifié. En effet, les effets d'un défaut peuvent rapidement se propager conduisant alors à la dégradation des pièces fabriquées ou, même pire, à des défaillances catastrophiques du procédé.

[12] A titre d'exemple, on peut citer la tête PRECITEC YW52 utilisé sur la machine IREPA (Se référer au compte rendu d'avancement à 3 ans du lot 3 (11/10/2013. Référence DDPP/CDE 13095).

Le contrôle-commande va plus loin puisqu'il vise à *garantir un fonctionnement le plus régulier possible* pour maintenir le processus sur son point de fonctionnement, en agissant en ligne sur les entrées de commande en fonction de l'observation des variations éventuelles des sorties dès leur apparition.

La définition précédente met aussi en évidence le fait que selon l'utilisation finale de la mesure, des caractéristiques diverses sont recherchées. Ainsi les objectifs de traçabilité (visualisation synoptique, alarmes, maîtrise statistique de la qualité,….etc) ne sont pas les mêmes que ceux du contrôle/commande. Un capteur donné peut être destiné à réguler que pour générer une alarme par exemple. Cette relation forte entre l'appareil de mesure et la fonction associée à l'exploitation de cette mesure est une composante essentielle de l'ingénierie de la mesure et de l'automatique. Dans le cas de l'instrumentation par vision du bain liquide, les paramètres du bain, peuvent être enregistrés puis traités. Nous reviendrons dans le Chapitre IV sur les approches d'intégration des outils de surveillance (monitoring) dans les procédés de projection laser en complément de systèmes de commande.

I.4.5 Apports du contrôle/commande - Quelle solution et quels outils ?

L'observation de l'état actuel du fonctionnement des procédés de projection laser, montre bien que beaucoup d'installations existantes sont pilotées en *boucle ouverte*, laissant des ajustements fréquents à la charge des opérateurs et typiquement, par une analyse visuelle de l'opération en cours indiquera a posteriori les corrections à imposer aux paramètres (telles que la montée en Z, les débits, …etc). Ces réglages font appel principalement à des approches empiriques basées sur les méthodes essais-erreurs. Parmi ces méthodes, on trouve *l'étude paramétrique post mortem*, permettant de mettre au point les différents éléments du procédé et le calcul des paramètres optimaux de réglage (en terme de rendement et de la stabilité de construction). Cette méthode est souvent longue, fastidieuse et peut difficilement être optimale. Ainsi le temps[13] et le coût de développement d'une pièce peut très vite augmenter suivant la nature de l'étude. L'inconvénient majeur de cette approche est que l'on n'a aucune information sur la *sensibilité des paramètres procédés*, et les résultats ne sont malheureusement pas toujours transposables d'un matériau à l'autre. Par conséquent toute modification ultérieure ou l'utilisation d'un nouveau matériau, nécessite de reproduire tous les essais d'où un coût non négligeable qui affecte directement la rentabilité de la pièce produite. Même si cette optimisation de paramètres opératoires permet d'obtenir de bons résultats (dans des situations spécifiques) et de garantir sous certaines conditions les qualités finales de la pièce, *elle ne suffit pas à assurer un déroulement conforme de la construction*, car elle n' a aucun moyen d'interagir avec le procédé pour corriger au cours de fabrication un défaut comme par exemple, des modifications des conditions d'interaction (échauffement progressif de la pièce, défocalisation du faisceau, …etc) ou un dysfonctionnement d'un actionneur (source laser, distributeur de poudre,….etc). Il est important de souligner que cette stratégie de commande n'est valable que si les perturbations ont un effet faible (négligeable en fait) ou si le procédé atténue naturellement l'effet de ces perturbations.

Prenons l'exemple du fonctionnement des systèmes existants en boucle ouverte (c.-à-d. sans contrôle de procédé). Dans cette configuration, les spécifications de construction imposent les entrées désirées (consignes), qui sont fixées à des valeurs prédéfinies obtenues par les études paramétriques du procédé (cartographies du procédé), telles que nous venons de l'exposer. Nous savons d'une part que toutes *perturbations extérieures* sur les paramètres procédés ou des variations des conditions d'interaction conduira systématiquement à des *variations de la qualité de la pièce fabriquée*, car Il n'y a aucun moyen d'interagir avec le procédé pour réduire (ou *corriger*) les effets de

[13] Ce temps comprend aussi le temps de projection à proprement parlé auquel s'ajoute le temps de préparation en amont de la fabrication, c'est-à-dire le temps de traitement du fichier CAO et le temps de programmation machine.

ces perturbations extérieures ou les erreurs cumulatives lors de la fabrication. Par contre, dans une configuration avec contrôle procédé (c.-à-d. en *boucle fermée*), il est indispensable de *mesurer* en temps réel les sorties de notre procédé (qui sont les critères d'évaluation de la qualité de construction), afin de les *comparer avec les entrées désirées*. Selon l'écart (*erreur*) observé, et sur la base de *la connaissance de la dynamique du procédé* (modèle) et des objectifs de commande choisis (qui pourrait être aussi de surveillance), un dispositif de commande ou *régulateur* (intégré dans un ordinateur) permet de calculer une *action de commande* à appliquer au procédé pour modifier en temps réel les valeurs de paramètres les plus influents sur le procédé (puissance, vitesse, débit massique) pour *compenser* les perturbations et d'autres irrégularités dans le procédé.

La Figure I.9, illustre, le schéma de principe du procédé de projection laser avec et sans contrôle/commande (c'est à dire, en boucle ouverte et en boucle fermée) sur une boucle de commande liée aux observations du bain liquide.

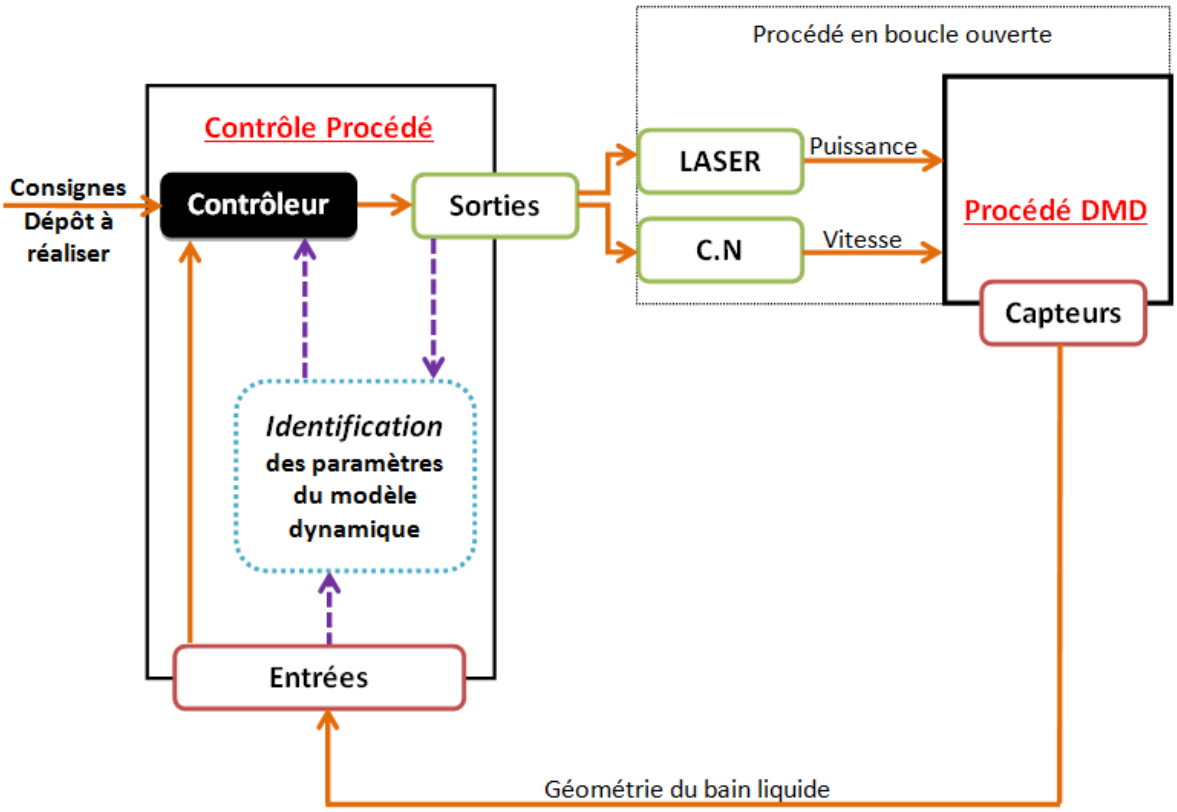


Figure I.9 – Contrôle en boucle ouverte en en boucle fermée

Dans le développement de l'exemple ci-dessus, nous avons établi les voies principales utilisées pour *l'automatisation du procédé de projection laser*, sans préciser la nature des contrôleurs et de nombreuses opérations mises en œuvre. Nous reviendrons plus en détail dans les prochains chapitres et nous mettrons en évidence au Chapitre IV à travers des exemples concrets l'importance et l'intérêt de la régulation.

I.4.6 Les limites des contrôles-commande existants

Le contrôle en temps réel du procédé de projection laser relève encore du domaine de la recherche et reste peu appliqué dans l'industrie, pour différentes raisons :

- L'analyse des articles proposés au sujet des contrôles en temps réel du procédé de projection laser montre en fait que beaucoup d'études ont été entreprises en négligeant au moins l'une

des caractéristiques du procédé énumérées dans le § I.4.1 : Les boucles de commande implantées sont typiquement des régulateurs complètement *découplés et monovariables* qui ne prennent pas en compte les caractères spécifiques d'un certain nombre d'opérations : *la non linéarité, la non stationnarité, les interactions existant entre les différents paramètres du procédé et les variations des constantes thermiques des matériaux ou des variations des conditions opératoires*. Les lois de commande élaborées sont souvent limitées en pratique devant ces caractères spécifiques du procédé et de la *complexité des phénomènes physiques mis en jeu* dans le procédé, ce qui nécessite de contrôler à la fois plusieurs variables et de tenir compte des non stationnarités. Cela nous a conduit à la recherche de solutions de contrôle plus avancées et plus adaptées (Voir Chapitre IV) ;

- Les algorithmes de commande ont été étudiés pour différents matériaux, différentes techniques d'apport de matière, différents procédés. Cependant, la majorité de ces études se basent sur une modélisation limitée à des pièces travaillant dans des conditions simples (sur un dépôt unique et sur un substrat plat). Or, l'industrie se dirige de plus en plus vers la conception et la réalisation de pièces à *géométrie variable sur des temps de cycle très long*. Un exemple type de ce besoin est la réalisation du mélangeur air chaud/air froid[14] (Démonstrateur Dassault) qui comporte des pièces de grande dimension avec des architectures 3D complexe, et notamment des épaisseurs des parois évolutives. Du fait de l'utilisation de stratégies de construction, engendrent des histoires thermiques variables, ainsi que l'évolution de la géométrie du bain au fur et à mesure de la superposition des couches, qui, en fonction des paramètres opératoires, peuvent conduire à des cycles thermiques non maîtrisés qui peuvent fragiliser localement la pièce [7] [1]. Il est donc impératif de prendre en compte ces singularités afin d'adapter les paramètres du procédé (Puissance, vitesse, stratégie de construction,…) en conséquence.
- Systèmes généralement développés pour des applications spécifiques et donc peu adaptables. Ceci doit être imputé en partie au fait que le procédé de projection laser reste une *technique récente et encore marginale*, ne concernant réellement qu'un nombre assez restreint d'entreprises et d'applications ;
- Contraintes supplémentaires sur les *capteurs* et sur *l'environnement de fabrication*. En effet, l'intégration des capteurs entraine des surcoûts et encombre le système de projection, ce qui limite également leurs mises en œuvre. De plus la *robustesse du traitement de données* est encore à améliorer.

I.5 Contexte et cadre industriel de l'étude

I.5.1 Le projet FALAFEL

Cette thèse s'inscrit dans un projet national labellisé FALAFEL (**F**abrication **A**dditive par **LA**ser et **F**aisceau d'**EL**ectrons) par le Fonds Unique Interministériel (FUI). Le projet s'articule autour de deux principaux axes :

- *l'industrialisation* de procédés de fabrication additive de pièces métalliques adaptés au secteur aéronautique, avec la fusion de lits de poudre par faisceau laser et la projection laser. L'industrialisation sous-entend : la disponibilité de machines de fabrication plus grandes que celles existant aujourd'hui sur le marché, la maîtrise et la qualité de fabrication (modélisation), la traçabilité et la reproductibilité avec le *contrôle de procédés*,
- la mise en œuvre de matériaux aéronautiques autres que le TA6V, tels qu'une base Nickel (le Nimonic C263), une base Molybdène (le TZM), un alliage Aluminium-Lithium (2195), un acier haute performance (le Marval X12), et l'élaboration de composites à matrice métallique à partir des mélanges TA6V/B4C et TA6V/Ti/B4C.

[14] Source : Compte rendu de la réunion FALAFEL tâche 3 en date du 15 février 2012.

13 partenaires se sont regroupés autour de ce projet : 5 industriels du GIFAS (*DASSAULT AVIATION, EADS IW, EUROCOPTER, MBDA, SNECMA*), 1 centre de transfert technologique (*IREPA Laser*), 3 PME (*ARES Laser, Poly-Shape, TPSH*) et 4 laboratoires renommées pour leurs compétences dans des problématiques liées à la fabrication additive et aux matériaux (*Arts et Métiers, Centre des Matériaux-ARMINES, le LERMPS-UTBM et l'ENISE*).

Le projet est décliné en 6 tâches, dont chacun des partenaires a en charge tout ou partie. Voici l'ensemble des tâches :

- T1 : Management
- T2 : Méthodes et spécifications de la filière poudre
- *T3 : Développement, optimisation et étude du procédé de projection laser*
- T4 : Etude et optimisation des procédés de fusion de lits de poudre.
- T5 : Etudes matériaux – Démonstration
- T6 : Validation technico-économique.
- T7 : Transfert industriel.

L'ensemble de ces tâches est planifié sur une durée de 42 mois. Le projet est piloté par la société EADS IW, avec Mme. *Laëtitia KIRSCHNER* et M. *Gilles SURDON* (DASSAULT AVIATION) responsables de la tâche T3.

I.5.2 Les besoins industriels vis-à-vis du procédé

La fabrication additive et notamment le procédé de projection laser est un des procédés très prometteur qui intéresse beaucoup d'industriels, car il offre la possibilité de passer directement du fichier CAO à la pièce réelle sans outillage. Il se dégage néanmoins de ce procédé un ensemble *d'enjeux*. La liste suivante reprend les éléments le plus souvent énoncés, sans hiérarchie :

- réduire les délais de conception et d'industrialisation des pièces;
- produire des pièces de meilleure qualité métallurgique et dimensionnelle avec un minimum de coût ;
- réduire les pertes de matière ;
- améliorer la flexibilité d'utilisation des systèmes de fabrication ;
- prendre en compte la notion de sécurité ;
- mémoriser l'histoire du procédé (traçabilité) ;
- tenir compte de la complexité croissante des pièces.

On mesure ici, au travers de ces enjeux, les grandes *attentes des travaux de cette thèse* doivent être à même de contribuer à combler. Face à ces enjeux et aux objectifs fixés par le projet, un automaticien devrait trouver, dans le procédé de projection laser, des objets d'études et d'applications nombreux. Or ce n'est pas aussi simple et de multiples contraintes rendent difficiles ces démarches :

- contraintes amont : le coût, l'encombrement, interaction laser matière... ;
- contraintes aval : opérateur, logistique,…. ;
- contraintes internes : complexité des procédés, environnement, technicité ;
- niveau des connaissances quant aux mécanismes et aux phénomènes physiques mis en jeu dans la procédé.

On y retrouve aussi bien des contraintes liées à l'amont et à l'aval du procédé qui concernent *le choix des capteurs* qui doit tenir compte de plusieurs considérations et contraignent fortement les apports potentiels des automaticiens, notamment de l'environnement de fabrication (encombrement du système, perturbations, …etc) et de la fonction recherchée (voir Chapitre II).

Indépendamment de ces contraintes, une approche scientifique tend à se développer ces dernières années. Celle-ci vise à s'appuyer sur les récentes avancées en termes de *modélisation et*

identification des systèmes [20]. Ces modèles couplés à une instrumentation adaptée permettent d'adjoindre aux procédés des *fonctions intelligentes* pour rendre leur fonctionnement optimal, sûr et reproductible, afin de les exploiter au mieux.

I.6 Objectifs du travail de thèse et méthodologie

La tâche 3 de ce projet pose le cadre et les objectifs de la thèse. Il s'agit de définir et fabriquer une machine de projection laser grande dimension dédiée aux applications aéronautiques et spatiales avec une aide à la qualification du procédé par une instrumentation et *l'intégration d'un contrôle procédé*.

L'objectif est de travailler sur l'intégration d'une *instrumentation du procédé* de projection laser, à travers le banc expérimental de laboratoire. Il s'agit donc dans un premier temps de mettre en place les équipements nécessaires pour *identifier la morphologie du bain* de fusion dans des conditions proches des conditions industrielles. Puis dans un second temps, de développer avec TPSH les capteurs répondant au besoin de ce projet.

Une fois la méthodologie validée, les données issues des capteurs, ainsi que la mesure de paramètres in situ (puissance laser, vitesse de déplacement,…) seront utilisés pour *identifier des modèles dits de commande, c'est-à-dire utilisables pour la synthèse de lois de commande*.

Enfin, un dernier objectif consiste à développer des *maquettes de système de contrôle procédé* permettant, à la fois, de suivre en temps réel les données géométriques du bain, mais aussi, d'avoir une boucle de contre réaction (boucle fermée) permettant de rendre le procédé plus robuste vis-à-vis de perturbations externes ou de disfonctionnements d'actionneurs.

Un *transfert* de cette méthodologie d'instrumentation, d'identification et de contrôle commande est réalisé sur les machines LIMOGES et/ou LENS 850R de de ce projet. Il s'agit d'appliquer les solutions technologiques et le savoir-faire acquis sur *le prototype de laboratoire*, pour l'élaboration de deux pièces types regroupant les principales difficultés rencontrées dans le milieu aéronautique.

Ces problématiques (*systèmes de mesure, modélisation et identification du procédé, de commande et de surveillance*) sont traitées dans le domaine de l'automatique, et apporte une solution innovante et prometteuse dans le cadre de cette démarche de garantie de la qualité des pièces fabriquées par le procédé DMD. C'est dans le cadre de cette approche que s'inscrit le cadre de cette thèse et la contribution que l'automatique peut apporter aux procédés de projection laser.

La méthodologie et les solutions proposées peuvent être résumées par les phases suivantes :

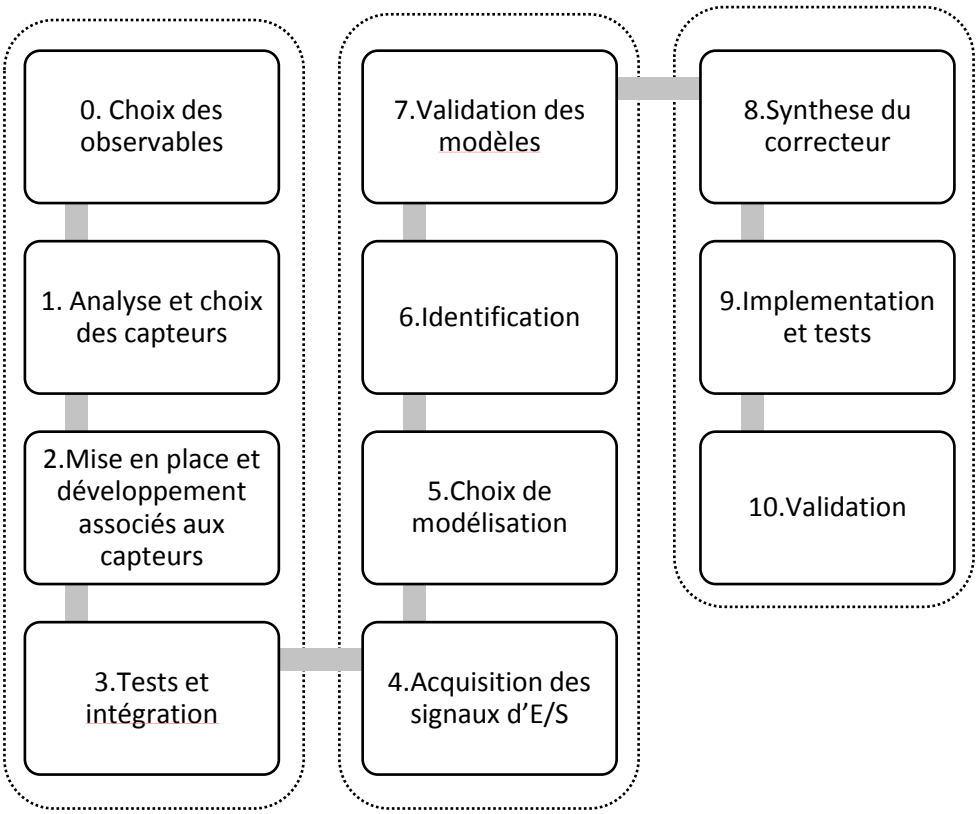


Figure I.1 – Démarche suivie

Les différentes études proposées au cours de cette thèse sur le contrôle procédé permettent de dégager *les principaux axes de recherches et les revendications de la thèse* :

1. Etude d'un dispositif de vision original pour la mesure des données géométriques du bain ;
2. Définition de la recette du procédé : il s'agit de disposer d'outils qui automatiquement permettent d'identifier des modèles pour le contrôle procédé ;
3. Prise en compte de la modélisation physique, du contexte multivariable, non linéaire et non stationnaire du procédé ;
4. Utilisation des outils de l'automatique moderne pour le contrôle-commande de la géométrie du bain par vision ;
5. Etude d'une structure de commande robuste pour éviter les phénomènes de saturation et de non-stationnarité inhérents au procédé de projection laser ;
6. Synthèse d'un contrôleur multivariable pour le procédé de projection laser. Le contrôleur obtenu est validé en simulation, permettant de modéliser le couplage (interactions) entrées-sorties.
7. Synthèse d'un contrôleur robuste à gain séquencé avec prise en charge de plusieurs points de fonctionnement. Les premiers résultats (de simulation) fournissent des résultats encourageant quant à la possibilité de mise en œuvre.

L'ensemble de ces avancées, ainsi que l'exploitation de ce retour d'expérience et des modèles issus de l'identification contribuera à fournir aux industriels et aux différents partenaires de nouveaux outils (*Toolbox*) leur permettant de contrôler les paramètres procédés lors de la fabrication de pièces. Cela permettra donc d'obtenir et de maintenir une haute qualité de la pièce fabriquée. Les démonstrateurs industriels bénéficieront de toutes les avancées technologiques qu'aura apportées le projet pour la fabrication de pièces pour l'aéronautique. Il est à noter que cette Toolbox n'en est qu'à un stade préliminaire et n'est pas encore complètement finalisée, mais sous condition de quelques

efforts de structuration, celle-ci pourrait très bien être utilisée et agrémentée par d'autres fonctionnalités pour le besoin de monitoring.

I.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de montrer que la maîtrise limitée du processus de fabrication lors de la réalisation d'une pièce peut conduire à des défauts non admissibles. Nombre de ces défauts peuvent être évités. Cela requiert une maîtrise et un contrôle temps réel des paramètres procédés. Cela passe par la mise en place d'un système d'instrumentation adapté au procédé (Chapitre II) et de modèles pour le contrôle/commande (Chapitre III).

Comme nous l'avons soulevé dans ce chapitre, le problème d'instrumentation reste un problème majeur rencontré lorsque l'on s'intéresse au contrôle procédé. La construction d'observateur (propriétés métallurgiques et mécaniques) représente ainsi la principale limitation dans ce domaine. L'aspect modélisation prend une place importante dans ce travail, l'objectif étant d'utiliser des modèles analytiques, couplés aux mesures de nombreux paramètres directement ou indirectement reliés à ces propriétés. Il s'agira alors de construire des observateurs permettant de fabriquer des mesures virtuelles de variables pour lesquelles les capteurs en ligne font défaut. Néanmoins pour que ces modèles soient le reflet du processus physique, ces modèles doivent être corrélés à des mesures effectuées en temps réel sur le procédé et les problèmes d'identifiabilité des paramètres devront être gérés dès la phase de modélisation.

Chapitre II

Développement des capteurs du procédé

II.1 Introduction

Nous avons développé dans ce projet un système de mesure, qui a pour objectif de valider les solutions nécessaires au suivi des paramètres procédés en condition quasi-industrielle. Pour ce faire, nous avons utilisé le poste expérimental disponible au laboratoire (nommé LIMOGES PRECISION) basé sur le principe du procédé de projection laser. Ce procédé a été couplé à un système d'instrumentation, qui permet de suivre l'évolution des paramètres procédés, en particulier les dimensions du bain liquide. Ces mesures sont primordiales pour d'une part, identifier un modèle pour le contrôle/commande et d'autre part contrôler le procédé en temps réel. L'implantation de ces capteurs pour le procédé nécessite de développer d'une part des solutions technologiques permettant leur intégration, et par la suite de définir des cas d'élaboration permettant de mettre en évidence les apports de ces capteurs, en particulier les paramètres procédés accessibles. Dans ce chapitre, nous discutons des capteurs et des techniques de mesures utilisées pour le contrôle/commande des procédés de projection laser. Nous préciserons ensuite ceux que nous avons retenus dans le cadre de l'étude, avec leurs montages associés.

II.2 Analyse bibliographique des capteurs pour le procédé de projection laser

II.2.1 Introduction

En partant du principe que le bain liquide est notre outil de construction de la géométrie de la pièce. Il est donc nécessaire d'avoir des capteurs pour mesurer les signaux caractéristiques produit par le bain (observables) et qui sont le reflet de certaines propriétés du bain liquide et après solidification du cordon de matière.

Aujourd'hui, le besoin de recourir à ces mesures est présent dans beaucoup de domaines, qui est retrouvé au travers du nombre croissant de publications sur le sujet. Quelles que soient les solutions retenues, on voit toujours apparaître deux types de systèmes :

1. *Les capteurs in situ*, directement implantés dans le procédé dans le but de surveillance ou de monitoring. A titre d'exemple, on peut citer la tête PRECITEC YW52[15] utilisée sur la machine IREPA (du projet FALAFEL),
2. *Les capteurs en ligne*, implantés dans une boucle pour la commande du procédé. Il s'agit des capteurs qui peuvent être utilisés en tant que signaux de rétroaction dans une commande en boucle fermée.

Le choix des capteurs peut être imposé par les observables souhaitées. De même, la finalité d'un capteur, pour la recherche ou pour une exploitation industrielle, oriente les choix vers des solutions différentes. L'existence de capteurs appropriés à notre application ne doit cependant pas masquer les difficultés propres au procédé de projection laser. Nous avons recensé quelques critères et *contraintes* qui composent le caractère spécifique de notre procédé :

- Robustesse de la conception pour des conditions difficiles (chaleur, éjection de poudre,…etc)
- la profondeur mesurable[16] qui correspond à la précision du système;
- l'emplacement[17] et la taille du capteur si des contraintes d'encombrement sont à prendre en compte ;

[15] Ces dispositifs sont à la base du contrôle de procédé nommé LWM (Laser Welding Monitor), largement utilisés dans le monde du soudage laser (Voir : http://www.precitec.de/)
[16] C'est-à-dire la hauteur Z (en considérant le bain comme un espace X, Y et Z) mesurable entre deux points
[17] Un capteur situé trop loin d'un appareil peut introduire un retard pur qui pénalise les performances des lois de commande.

- la vitesse d'acquisition;
- le champ de vue possible du capteur qui correspond aux dimensions du bain observable ;
- Le coût

La Figure II.1 n'a pas l'ambition de proposer une liste exhaustive des différents capteurs, mais fournit néanmoins une vue d'ensemble des différentes voies ouvertes pour la résolution de problèmes de mesure en temps réel. Le classement de ces techniques peut se faire de plusieurs façons différentes. Cette classification est basée sur les observables. Ainsi, on distingue les *observables liés à l'information de température et les observables liés aux géométries du bain*, qui font l'objet de deux sous-parties de cette section. Les mesures géométriques du bain font appel aux techniques optiques qui sont elles-mêmes divisées en deux catégories appelées vision active et vision passive. Le principe de fonctionnement de chaque méthode est présenté ainsi que leurs avantages et inconvénients. Lorsqu'une utilisation d'un capteur pour une application dans le procédé de projection laser existe, cela est mentionné. Il s'agit ici de trouver des réponses à des problèmes de mesure, aussi toutes les approches peuvent- elles être pertinentes. Encore faut-il respecter les contraintes évoquées précédemment et démontrer qu'un principe de mesure est approprié ou non. *Les justifications concernant le choix de capteur retenu dans le cadre de notre application, pour l'instrumentation du procédé sont présentées en fin de cette partie.*

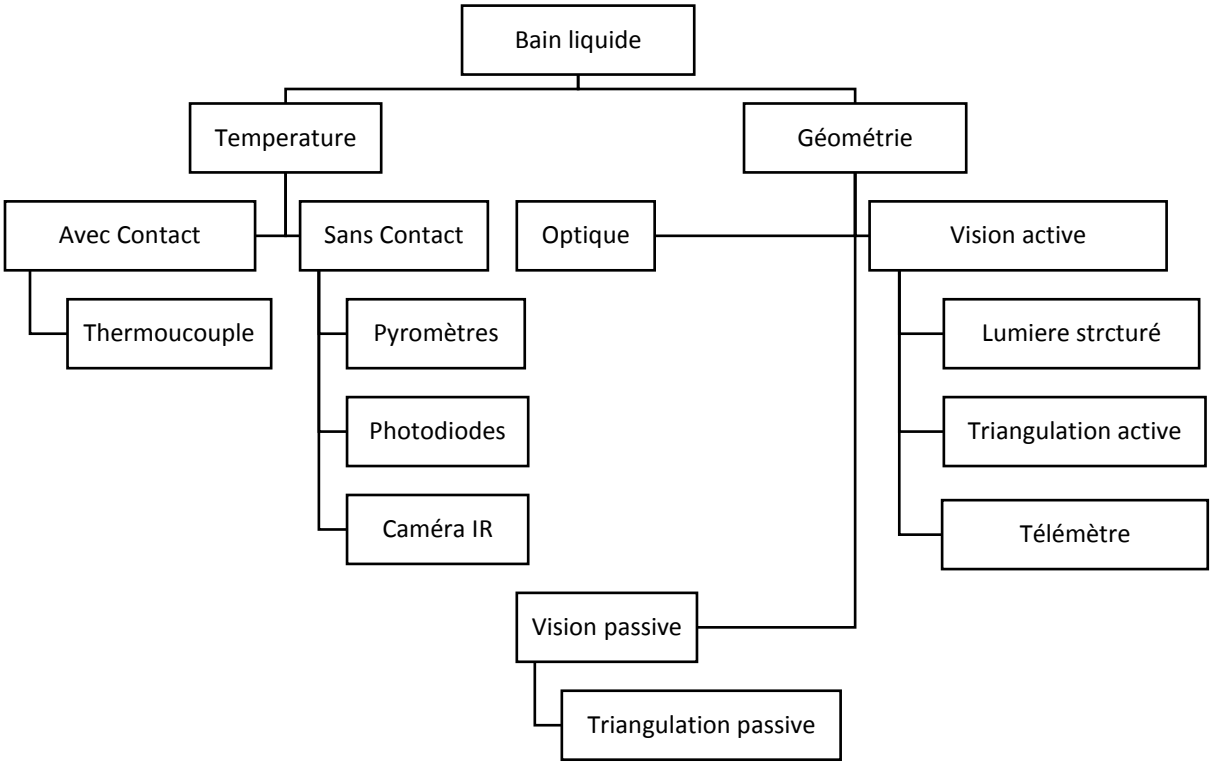


Figure II.1 – Classification des capteurs du bain liquide

II.2.2 Mesure de température

La connaissance de la température est un élément fondamental dans le procédé de projection laser. Elle détermine la qualité de la pièce au niveau métallurgique et mécanique. Pour la compréhension du comportement des matériaux pendant la construction de la pièce, la mesure et donc le contrôle de la température est un élément important.

Un grand nombre de publications traitant des instruments de mesure de la température a été rapporté dans la littérature. Ces capteurs peuvent être divisés en deux groupes : capteurs avec

contact et sans contact. Un état de l'art des capteurs de température et de leurs applications dans l'industrie est donné dans [21].

II.2.2.1 Mesure de température par contact

L'un des moyens les plus utilisés dans l'industrie pour des mesures de température par contact reste bien évidement le *thermocouple*. La mesure de température par thermocouple joue sur la différence des propriétés thermoélectriques de deux matériaux. A la jonction de ces matériaux va apparaître une différence de potentiel proportionnelle à la température de la jonction. Il est alors possible d'évaluer la température de la jonction (soudure chaude) en mesurant la différence de potentiel par rapport à une référence (soudure froide). Cette dernière correspond à la force électromotrice mesurée à une température donnée [21]. Cette technique permet de faire des mesures en surface comme des mesures intrusives, les fils étant relativement fins [22] [7]. Des mesures de températures par thermocouples à proximité de la zone fondue, ont permis à de nombreux auteurs d'évaluer les cycles thermiques et la distribution de température dans les procédés de projection laser [23]. *Les problèmes majeurs de ces capteurs sont* : (1) ils ne fournissent pas des mesures rapides ponctuelles et spatiales de températures, (2) leur positionnement à proximité du bain liquide peut les détruire, (3) ils gênent les phénomènes physiques par leur présence (perturbe le champ de température dans les zones de forts gradients thermique) (4) ils présentent un trop grand temps de réponse [24] [13] et surtout le thermocouple est difficile à positionner ponctuellement dans le temps puis de l'évacuer. Bien entendu, *ces capteurs ne sont donc pas très appropriés pour le contrôle temps réel du procédé*.

II.2.2.2 Mesure de température sans contact

Les nombreux avantages des mesures de température sans contact comme son caractère non-intrusif, sa facilité de mise en œuvre même dans des conditions hostiles, la large gamme de températures accessibles en ont fait une technique largement utilisée dans les procédés laser [25] [26].

Dans la plupart des capteurs de température sans contact, l'évaluation de la température se fait grâce à la luminance émise par le corps (*rayonnement thermique*). Le principe de ces capteurs repose sur *l'équation de Max Planck*. Elle établit la relation existant entre la luminance énergétique d'un corps noir[18], la température de ce corps et la longueur d'onde à laquelle l'observation est faite (Figure II.2) [22].

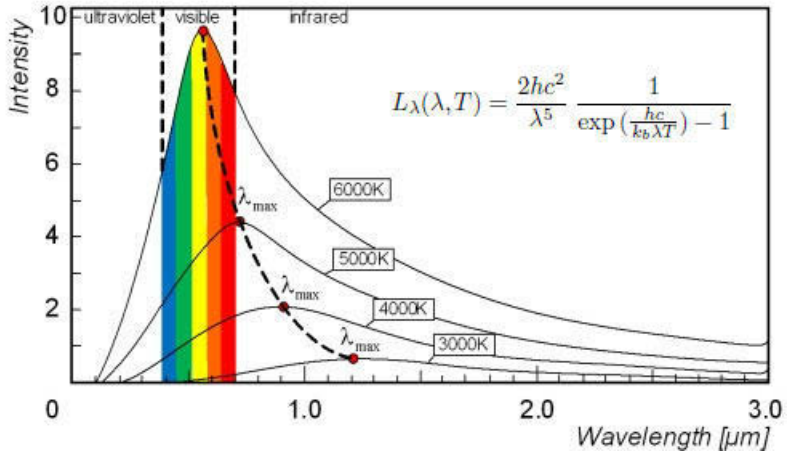


Figure II.2 – Distribution d'énergie de corps noir

[18] Par définition, c'est un corps idéal qui absorbe la totalité des rayons incidents qui le frappe, quels que soient leur longueur d'onde ou leur angle d'incidence, et qui émet un rayonnement répondant à la théorie fixé par la loi de Planck.

Les maxima d'énergie émise se déplacent vers les longueurs d'onde les plus petites avec l'augmentation de la température. Cette analyse a permis de formuler la loi de déplacement de Wien :

$$T\lambda_{max} = 2.898 \cdot 10^{-3}\ m.K \quad \text{(II.1)}$$

Dans le cas d'une intégration de la luminance spectrale sur la totalité du spectre des longueurs d'onde, on aboutit à la loi de Stefan-Boltzman qui caractérise l'énergie totale par le corps noir à la température T:

$$L = \int_0^{\infty} L_\lambda \, d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{(II.2)}$$

Avec σ=5,6703210 W.m^{-2}K^{-4} constante de de Stefan-Boltzman

La température T déduite de la mesure de la luminance est appelée *température de luminance* ou température de corps noir. Généralement, la mesure de luminance s'effectue sur bande spectrale limitée, qui dépend principalement du domaine de températures qui doit être mesuré.

Les objets réels se distinguent du corps noir idéal par le fait qu'ils émettent un flux toujours inférieur à celui du corps noir, quelles que soient la température et la longueur d'onde. Pour un corps réel, on caractérise ses propriétés thermo émissives par son émissivité, c'est à dire le rapport entre sa luminance L et celle du corps noir dans les mêmes conditions [27]. *L'émissivité* spectrale directionnelle dans la direction D a donc pour expression :

$$\varepsilon(\lambda, D, T) = \frac{L_{\lambda\ objet\ réel}(D,T)}{L_{\lambda\ corps\ noir}(T)} \quad \text{(II.3)}$$

Avec : D direction du rayonnement émis par le corps réel, T température et λ longueur d'onde.

L'émissivité est une grandeur sans dimension dont la valeur est comprise entre 0 et 1. Elle *est influencée par les paramètres suivants* [28] :

- la nature même du matériau
- son état de surface
- la longueur d'onde
- la direction de l'émission
- la température du matériau.

Généralement la courbe d'émissivité en fonction de la longueur d'onde présente un maximum, on dit que le corps est sélectif. Dans le cas d'une courbe plate, le corps est gris. La mesure de température par rayonnement suppose souvent que le *corps est gris*, mais de plus en plus les pyromètres ou caméras thermiques sont étalonnées pour tenir compte des propriétés émissives du corps observé [27]. *La réalisation d'un étalonnage optimal de ces appareils, qui est un élément clé pour la précision des mesures, apparaît comme un problème non trivial* [28].

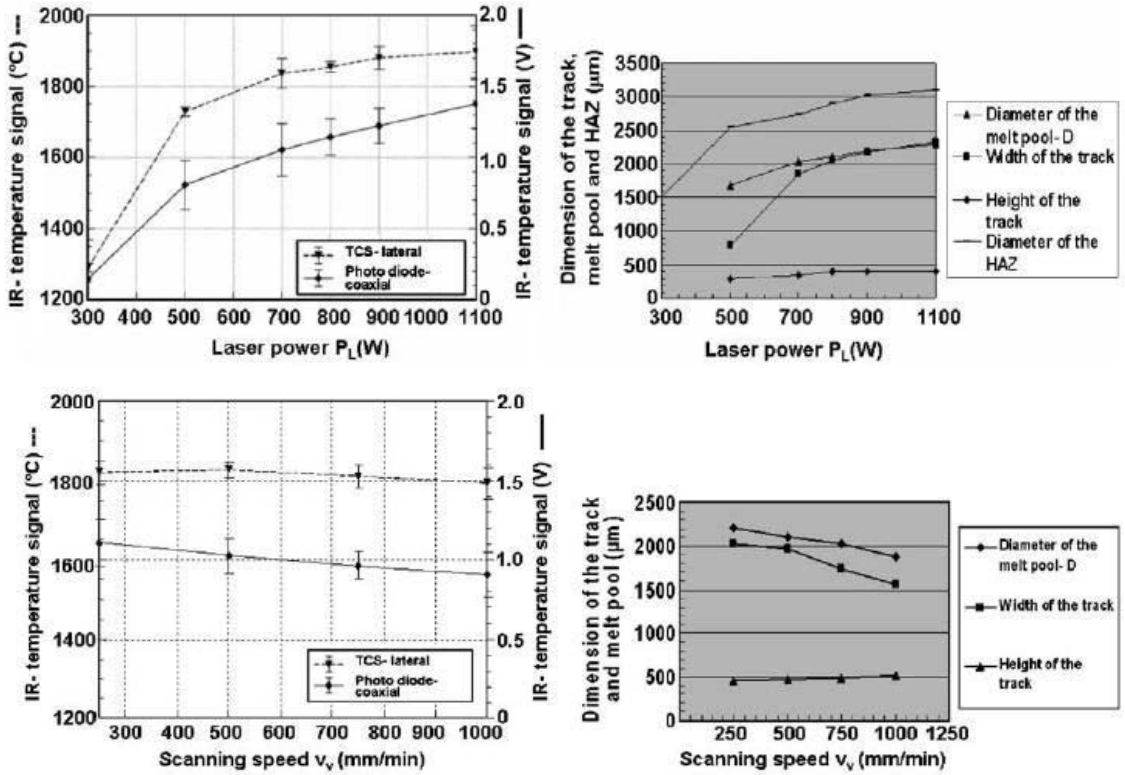
La sélection d'une bande spectrale précise fixée par la bande spectrale de la photodiode et par l'utilisation de filtres optiques, permet de recueillir des informations sur un domaine particulier de l'interaction laser-matière. A titre d'exemple, un bain de fusion dont la température est comprise entre 1000 K et 2600 K, rayonne principalement dans le proche infrarouge (d'après l'équation 1 : les maxima d'émissivité se situent dans la bande spectrale [966nm, 1115nm]). Plus précisément, [19] [29] ont montré qu'une étude spectrométrique des émissions propres du bain liquide permet de mettre en évidence des longueurs d'onde précises dont les variations d'amplitude donnent des informations intéressantes en contrôle en ligne, car elles sont corrélées au comportement de l'interaction laser-matière.

L'application de ces principes est le fondement de nombreuses caméras IR, pyromètres ou de caméra à bolomètre [26] :

Le pyromètre est un dispositif composé d'une lentille qui focalise le flux radiatif sur un détecteur qui la convertit en signal électrique qui a travers *l'algorithme de calibration* fournit une mesure de la température de l'objet visé dans une gamme de longueur d'onde. Il existe deux principaux types de pyromètres : pyromètre *monochromatique* et *bi-chromatique* (ou multi longueur d'onde). Le pyromètre monochromatique mesure le rayonnement dans une seule gamme de longueurs d'onde pour calculer la température. *La plupart des pyromètres monochromatiques offre la possibilité de régler la valeur de l'émissivité*. Un pyromètre bi-chromatique mesure la température en prenant en compte le rapport entre les énergies mesurées pour deux longueurs d'onde différentes, en supposant que l'émissivité varie peu de la première bande à la seconde. L'idée de base est *d'éliminer l'émissivité*, le paramètre dont la connaissance est indispensable pour effectuer une mesure correcte à l'aide d'un pyromètre monochromatique [28].

Le principe de fonctionnement d'une *caméra infrarouge* est le même que celui d'un pyromètre monochromatique. La différence est que dans le cas d'une caméra infrarouge nous avons une matrice de capteurs enregistrant la lumière émise par un objet. De cette façon, la lumière collectée par un système optique sur la matrice crée une image objet qui peut être enregistrée. Ceci permet de mesurer un champ de température à sa surface, ce qui est incontestablement un avantage sur le pyromètre si le phénomène observé présente des gradients spatiaux. Cependant, *comme pour le pyromètre, la caméra infrarouge exige une sélection correcte de l'émissivité* [27].

Les capteurs décrits précédemment ont largement été utilisés dans les procédés de projection laser pour la *détermination des températures dans les zones fondus* : [17] [30] [31] [32] utilisant un pyromètre multi-longueurs d'onde et un pyromètre bi-chromatique ont permis d'étudier *l'influence des paramètres procédés (PVD) sur la température et les dimensions du bain liquide*.



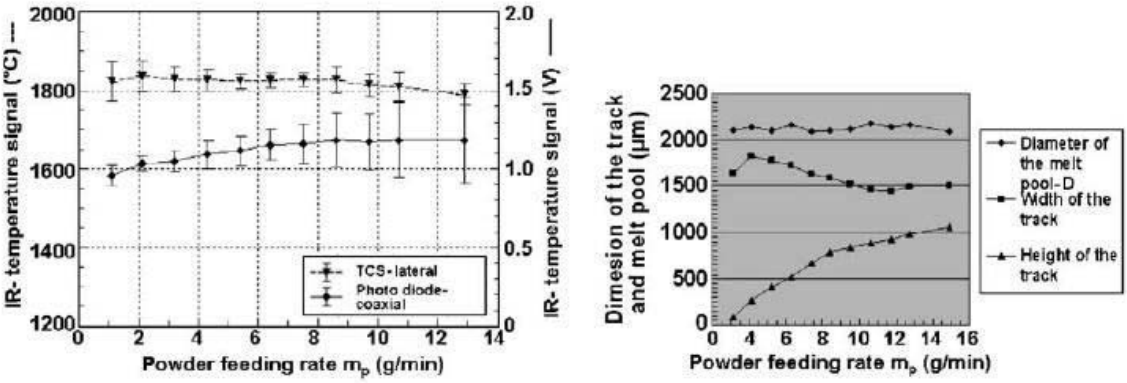


Figure II.3 – Influence de la puissance, la vitesse et le débit de poudre sur la température et les dimension du cordon [26]

[5] a utilisé un pyromètre calibré en même temps que des thermocouples afin de mesurer *l'évolution de la température d'une couche N (cycle thermique)* visée par le pyromètre au moment de son dépôt sur le mur et après des dépôts de couches successives (Figure II.4).

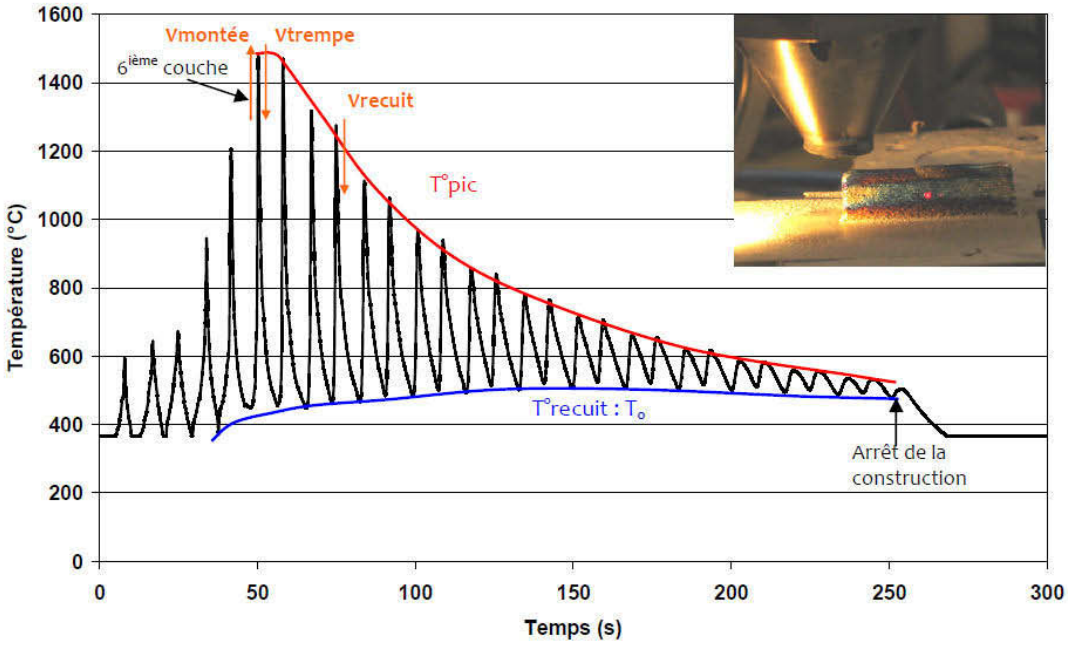


Figure II.4 – Instrumentation par pyromètre laser de la sixième couche d'un mur en TA6V P300V300Dm1

La pyrométrie par spectroscopie développée dans la thèse de [25] a permis à [6] de *mesurer simultanément et indépendamment la température et l'émissivité ε du TA6V* sur une plage de 560 µm de diamètre, au centre du bain liquide (Figure II.5). Ainsi, une émissivité expérimentale de ε=0.37 pour une température moyenne en zone fondue de 2700 K a pu être déterminée sur la bande spectrale [500 nm-700 nm].

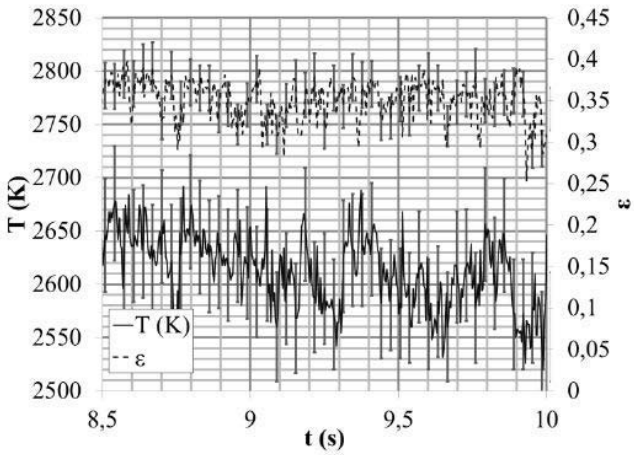
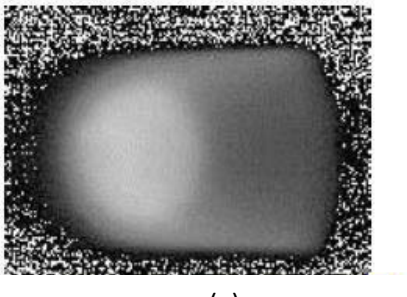
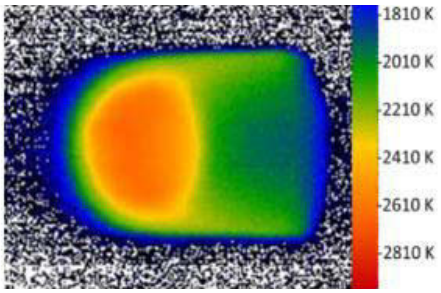


Figure II.5 – Evolution de la température et de l'émissivité en fonction du temps dans une zone sonde de 0,56 mm de diamètre au centre du bain liquide : P=600 W, V=0,4 m/min et Dm=1 g/min [6]

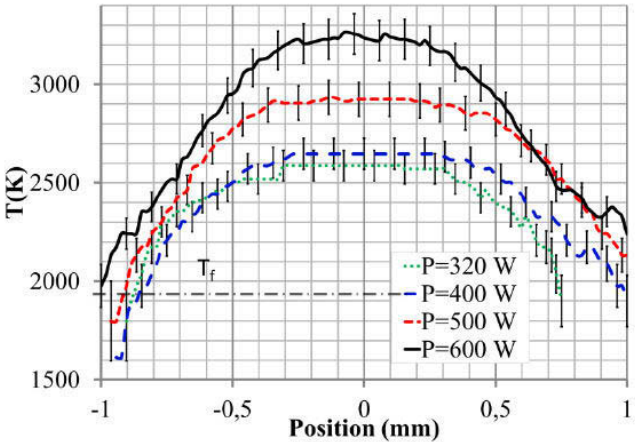
Des capteurs à base de caméras (CCD ou CMOS) ont déjà été employés pour réaliser des mesures de températures dans le procédé de projection laser [6] [26] [33] [34]. Ces mesures sont basées sur la loi de Planck de rayonnement de corps noir : une caméra enregistre la luminance en chaque point du bain liquide. Cette luminance (niveau de gris) permet, en connaissant l'émissivité de la zone observée, de calculer les champs de température dans les zones fondues. [33] utilise une caméra CCD proche infrarouge (700 – 1006nm) préalablement *thermiquement calibrée* pour réaliser des *mesures de températures et pour déterminer les contours du bain liquide pour contrôler la vitesse de refroidissement à l'interface solide-liquide et ainsi contrôler la microstructure.* La caméra peut mesurer des températures de 1600 à 2100K. On trouve la même étude dans [6] qui a permis une évaluation des températures maximales et des gradients thermiques à l'origine des mouvements convectifs dans le bain liquide en TA6V [6] (Figure II.6).



(a)



(b)



(c)

Figure II.6 - Résultats de mesure de températures par pyrométrie 2D à bande spectrale [6] : (a) Cartographie de température (K) dans le bain liquide, (b) Distribution de température T=f(y) en fonction de la puissance (V=0,4 m/min et Dm=1 g/min)

D'autres auteurs ont utilisé des *caméras thermiques* pour la mesure de température et sa distribution dans les bains liquides. Ces études ont permis d'étudier *l'influence des paramètres*

procédés (PVD) sur la forme et les dimensions du bain liquide [35]*, les états de surface* [6]*, les mouvements hydrodynamiques 3D du bain liquide* [7] *et la microstructure des murs fabriqués* [6]. Notons que, les mesures de température obtenues par la caméra thermique[19] dans le cadre des travaux de thèse de [6] n'ont pas permis de déterminer précisément les températures en zone fondue pour plusieurs raisons :

- La résolution spatiale de la caméra thermique était trop limitée dans les conditions utilisées (1pixel = 200µm) ce qui ne permet pas d'évaluer les gradients de température dans le bain liquide.
- La fréquence d'acquisition limitée (< 100 Hz pleine fenêtre), a posé un problème pour l'étude du régime pulsé,
- Une émissivité fixe est considérée sur toute la fenêtre d'analyse et pendant toute la période d'acquisition. Or, une nette transition d'émissivité existe entre le liquide et le solide.

Une autre approche pour mesurer la température du bain liquide consiste à mesurer le signal électrique issu d'une *photodiode* et de la corréler à la température [26] [31] [36]. Cependant, l'inconvénient de ces capteurs est que, le signal délivré est difficile à interpréter, car toute variation autour d'une valeur moyenne sera décelée sans pouvoir être attribué à tel ou tel paramètre (débit de poudre, puissance laser,…). En effet, une augmentation de température ou de taille du cordon sera perçue de la même façon par la photodiode [24]. En plus, ils sont *sensibles aux variations d'émissivité et aux interférences de l'interaction laser-poudre-fumée*. Une photodiode ne donne par conséquent d'informations que sur la morphologie temporelle de l'objet visé et en aucun cas sur la distribution spatiale d'énergie comme les caméras thermiques.

II.2.3 Mesures géométriques

L'évolution technologique des capteurs d'images (CCD/CMOS), les performances des systèmes d'acquisition associés, la diminution des prix d'achat, ainsi que l'accroissement des performances et les possibilités de traitements d'images offertes par les ordinateurs actuels (de type PC), ont conduit à un grand nombre de publications et d'applications de *systèmes de vision industrielle pour la mesure des dimensions du bain pour le contrôle/commande du procédé de projection laser* [24].

Dans le cadre de notre procédé, l'intérêt d'utiliser un capteur de vision pour mesurer les dimensions du bain liquide, présente de nombreux avantages comme *la rapidité ou la fiabilité du contrôle non destructif, la simplicité de l'installation, la flexibilité, le coût, ou encore la possibilité d'extraire des informations quantitatives sur les objets observés*. Ainsi, le contrôle d'aspect en temps réel et le contrôle dimensionnel sans contact sont des applications directes du traitement d'images en temps réel et cela dans des industries aussi diverses que celles de la métallurgie, du bois, du papier ou bien encore les industries pharmaceutiques ou agroalimentaires [37] [38].

Pour effectuer cette mesure, plusieurs dispositifs peuvent être envisagés. Ces dispositifs peuvent être divisés en deux catégories, vision active et passive [39].

II.2.3.1 La vision active

Le principe général des mesures dimensionnelles utilisant *la vision active repose sur l'utilisation conjointe d'une caméra et d'une source d'énergie lumineuse*. L'émission de lumière utilisée peut être de différents types tels que le laser ou la projection d'une lumière structurée et va dépendre de l'application visée.

Dans sa forme la plus simple, la lumière structurée est un unique rayon émis par une source et d'une caméra formant un triangle, faisant apparaître sur l'objet un point de surbrillance (Cf. Figure II.7a). Le système étant préalablement calibré, l'orientation et l'inclinaison spatiale de la caméra et du laser

[19] FLIR SC4000, dotée d'un capteur InSb de 320x240 pixels, travaillant dans la bande spectrale 2-4 µm

sont connues. Ceci permet essentiellement, par *triangulation*[20], de déterminer la distance entre la caméra et l'objet au niveau du point projeté. Le principal inconvénient de cette méthode est le nombre très élevé de points à acquérir pour obtenir une reconstruction acceptable de l'objet. Afin d'accélérer la procédure d'acquisition, le point laser peut être orienté vers un système de lentilles divergentes (cylindriques) afin de transformer ce point en une ligne laser ou plan de lumière (on parle alors de *profilométrie*) (Cf. Figure II.7b). Ce plan, d'équation connue, fait apparaître sur l'objet un segment de surbrillance observé par le capteur d'images. Aux pixels éclairés décrivant le profil sont associées des directions dans l'espace 3D (à condition que le capteur d'images soit étalonné). Il s'agit donc de déterminer les points 3D d'intersection du plan de lumière et des lignes de vue 3D associées aux pixels. L'utilisation principale concerne le domaine industriel pour de la rétro-conception ou du contrôle qualité. L'inconvénient de l'utilisation de pointeurs laser est la nécessité du déplacement ainsi que le nombre d'acquisitions importantes à effectuer. Un autre problème survient lorsque la ligne n'est pas entièrement visible par la caméra (phénomène appelé occlusion), ce qui entraine un problème de mise en correspondance.

Enfin, la lumière structurée peut être un *motif bidimensionnel* que l'on projette sur l'objet (Cf. Figure II.7c). Il peut s'agir d'une grille (matrice de points) ou d'un faisceau de lignes[21]. L'estimation de la distance entre le capteur et l'objet peut se faire par une étude de la déformation du patron projeté ou par une mise en correspondance entre la matrice de points projetée et les données observées par le capteur.

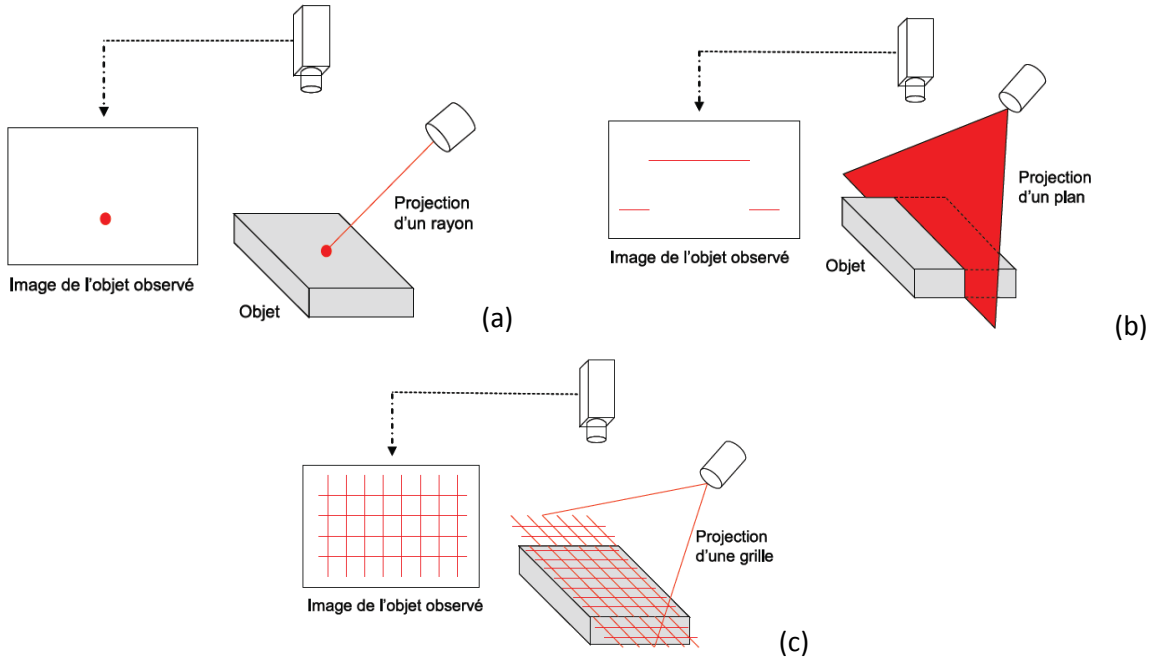
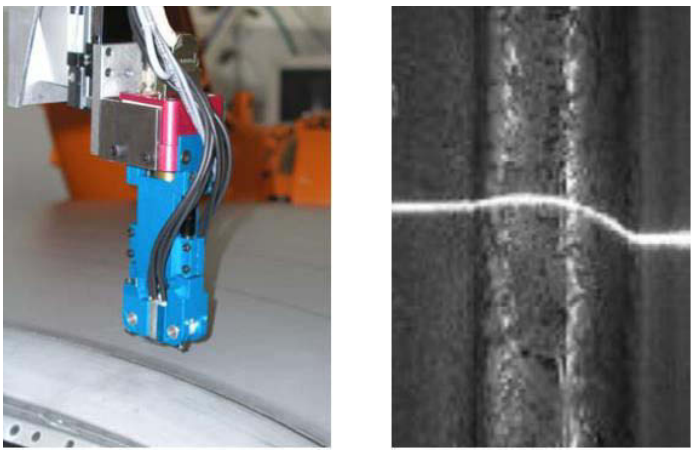


Figure II.7 – Technologie de vision active en lumière structurée [39] : (a) Projection d'un rayon lumineux, (b) Projection d'un plan lumineux, (c) Projection d'un motif lumineux bidimensionnel

[20] Une autre technique appelée *télémètre laser* consiste à émettre une impulsion de lumière laser qui est réfléchie par l'objet. Le résultat de cette réflexion est détecté par un capteur et le temps écoulé (temps de vol) entre l'émission et la détection donne la distance objet/capteur. Une autre variante, consiste à moduler en amplitude l'onde laser puis à mesurer le déphasage entre l'onde émise et l'onde reçue. La mesure de distance est déduite de cette différence de phase.

[21] Plusieurs travaux de recherche sur le regroupement et la comparaison des différents types de motifs ont été publiés depuis plus de dix ans. Parmi les plus populaires, on peut citer [Salvi et al., 2010].

La vision active a été largement utilisée en soudage par laser dans le suivi de joint[22] *et le contrôle qualité des soudures réalisées* [40]. La Figure II.8 et Figure II.9 montrent des exemples d'applications de la vison active au soudage.



(a) (b)

Figure II.8 – Inspection de joint de soudure: (a) la tête de capteur, comprenant la caméra CMOS (en rouge), le laser et une source lumineuse (en bleu), contrôle un joint de soudure laser à l'aide d'une raie laser, (b) image du joint soudé par laser et de la ligne laser projetée (Source : Photonfocus) .

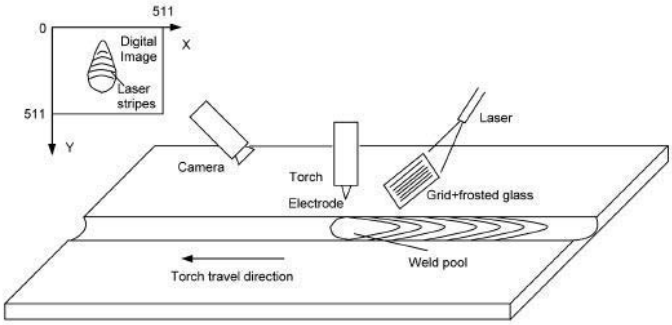


Figure II.9 – Exemple d'application de la vision active en soudage GTAW [40]

Néanmoins il ressort de la bibliographie que ces techniques utilisant une source de lumière secondaire sont limitées pour les raisons suivantes :

- Cette technologie tient aux surfaces de certains matériaux, qui dans certains cas possèdent un coefficient d'absorption élevé ne permettant pas de rétrodiffuser l'onde émise, ou qui dans d'autres se comportent comme des miroirs réfléchissant l'onde incidente dans une direction opposée à celle émise ;
- Du fait de la trop grande luminosité de la zone de fusion, la mesure ne peut se faire qu'en avant ou en arrière de cette zone ;
- La mise en correspondance entre la matrice de points projetée et les données observées par le capteur n'est pas triviale puisque rien ne permet de distinguer dans l'image un nœud d'un autre. En effet, la présence de la poudre et certaines émissions de nature électromagnétique et thermique qui ont lieu lors de toute interaction laser-matière perturbent les mesures et rend difficile l'émission d'un signal pour acquérir les données 3D.
- L'encombrement et les géométries à acquérir pour la fabrication additive

[22] La soudure (ou le rabotage) de flans est l'une des applications les plus importantes du soudage par laser dans l'industrie automobile. Parce que l'inspection humaine est trop chère et peu fiable, un système automatique de mesure a été développé dans l'industrie, pour permettre un contrôle minutieux du joint de soudure.

Concernant les travaux impliquant l'utilisation de la vison active dans les procédés de projection laser est quasiment nulle.

II.2.3.2 La vision passive

Contrairement à la vison active (celle-ci nécessitant un éclairage), *la vision passive n'impose pas, en général, des contraintes particulières sur la source d'éclairement et utilise les rayonnements émis par l'objet à mesurer* (visible, infrarouge, ….. etc.). Dans cette catégorie, on retrouve également des méthodes par triangulation mais utilisant plusieurs caméras, des méthodes se basant sur l'analyse des images acquises et des méthodes nécessitant une optique particulière. La vision passive est un outil privilégié pour mesurer les dimensions du bain liquide. *Une tendance est très marquée dans cette direction et les applications sont très nombreuses*. Le Tableau I.1 présente les résultats d'une étude bibliographique, non exhaustive, concernant les possibilités d'applications de la vision passive dans le procédé de projection laser.

	Références	Les grandeurs observées	Capteurs
Mesures directes	[41] [42]	Surface du bain	Caméra CCD/ Caméra thermique
	[2] [24] [33] [35]	Température de luminance	Pyromètre spectrale
	[29] [43] [44] [45]	Hauteur du bain	Caméra CCD
	[24] [30] [46]	Vitesse des particules	Caméra CCD
	[12] [19] [46] [47] [48]	Largeur du bain	Caméra CCD
Mesures indirectes	[49]	Profondeur du bain	Caméra CCD
	[19] [31]	Dilution	Caméra CCD
	[47] [50]	Vitesse de solidification	Caméra CCD

Tableau I.1 – La vision passive dans le procédé de projection laser

Comme l'illustre le Tableau I.1, nous distinguons deux stratégies devant un problème de mesure et calculs des paramètres obtenus sur le bain liquide. La première, est une *mesure directe* de la grandeur cherchée. La deuxième consiste à utiliser les liens (ou des *corrélations*) qui existent entre les variables du procédé pour avoir accès à des informations non directement mesurables par l'utilisation de grandeurs facilement mesurables. On distingue également les capteurs qui sont associés à des modèles mathématiques pour reconstruire au travers d'observateurs des informations non directement mesurables. C'est le rôle d'un capteur logiciel (souvent appelé *capteur virtuel ou capteur intelligent*). [49] a développé une méthode d'estimation de la profondeur de la zone fondue à partir de la surface mesurée du bain et à partir de la connaissance de la vitesse et des dimensions de la zone éclairée. [19] a mis au point un modèle permettant de corréler la dilution à la largeur du bain. [50] en mesurant l'angle entre la direction de solidification et la direction de déplacement, évalue les vitesses de solidification.

Les constatations retenues suite à cette recherche bibliographique effectuée au cours de mon travail de thèse sont :

- *Le nombre important de publications concernant l'application de la vision passive dans le procédé de projection laser, montre l'intérêt porté à ces techniques pour les mesures dimensionnelles du bain liquide dans le procédé de projection laser,*
- *Les domaines d'application les plus fréquents des systèmes de vision dans les procédés de projection laser sont :*
    - *Traçabilité ;*
    - *Surveillance de l'état de pièces projetées et détection de défaut : pour le bon fonctionnement global du procédé ;*
    - *Commande du procédé ;*
    - *Compréhension des mécanismes physiques qui ont lieu au cours de procédé, et de développer des outils numériques*

En considérant les applications envisagées dans notre procédé, l'état de l'art est volontairement axé sur les technologies permettant la mesure de la position en Z du bain liquide par vision passive.

II.2.3.3 Mesure de la position en Z du bain liquide par vision passive

Nous avons montré dans le premier chapitre l'importance de la montée en Z sur la stabilité de la construction. *Ce paramètre permet de pouvoir observer et réguler la progression de la fabrication des pièces*. Il est donc nécessaire d'avoir dans la boucle de commande cette mesure en Z. On distingue principalement deux catégories de systèmes de mesures en Z :

- *Mesures coaxiales* qui utilisent des procédés de mesure sur le chemin optique de la tête laser;
- *Mesures hors axe* qui utilisent essentiellement deux ou plusieurs caméras autour du bain liquide.

Le grand challenge dans ces dispositifs est d'avoir une bonne vision du bain sans interaction avec les particules de poudre couplée à un traitement en temps réel.

II.2.3.3.1 Mesure coaxiale

Les capteurs coaxiaux pour la mesure en Z utilisent le miroir dichroïque de la tête laser pour intercaler le montage entre les caméras et le miroir de renvoi. Dans cette catégorie, on trouve par exemple l'interférométrie, le stigmomètre, les systèmes confocaux, la défocalisation dynamique, la conoscopie ou la chromatie. Ces méthodes conduisent généralement à la réalisation de capteurs peu coûteux. Elles ont une large diffusion dans le domaine de la mécanique où on les trouve sous la forme de simple détecteur tout ou rien utilisé pour automatiser des machines, pour un coût plus élevé, elles sont rencontrées sous la forme de capteur mesurant unidimensionnel simple. Les systèmes les plus complexes permettent d'effectuer des mesures tridimensionnelles [51].

On retrouve, peu d'études sur l'application de ces dispositifs sur le procédé de projection laser. Un dispositif de relevé de distance en Z à base de photodiodes, a été proposé par le fabricant de la machine LENS (Figure II.10).

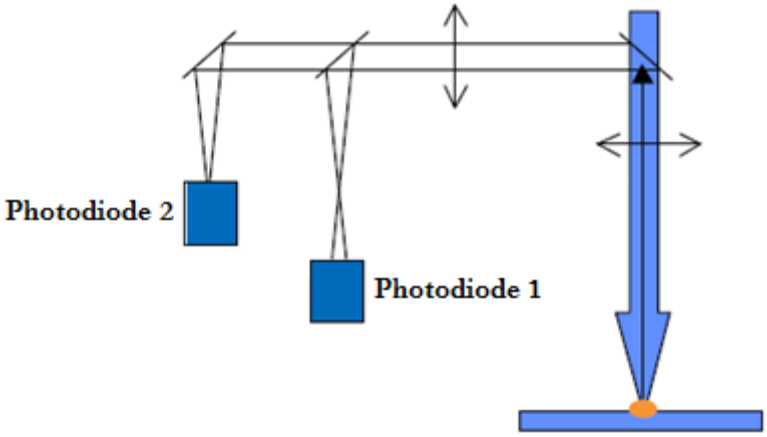


Figure II.10 – Mesure des intensités lumineuses en fonction de l'écart buse / foyer lumineux

Pour débuter la mesure, il faut que la lentille de focalisation parcourt l'étendue de mesure afin que le bain liquide donne une luminance maximale, c'est-à-dire à proximité de son foyer. Le système proposé fonctionne par comparaison entre deux signaux du bain faite à deux distances de part et d'autres de la focalisation du faisceau lumineux, c'est à dire autour de la fibre proche et de la fibre éloignée (*calcul différentiel en intensité lumineuse*). L'écart entre la lentille de focalisation et le bain liquide variant avec l'apport de poudre. Son observation donne une indication de la montée du mur. Ce système a été étudié par [12] dans le cadre du projet PROFIL. Il a montré lors des mesures des photodiodes éloignées et proches sur une trajectoire dont l'orientation du bain change (par exemple circulaire), que l'orientation du bain biaise ce procédé de mesure, le rendant quasi *inutilisable* en situation réelle.

II.2.3.3.2 Mesure hors axe

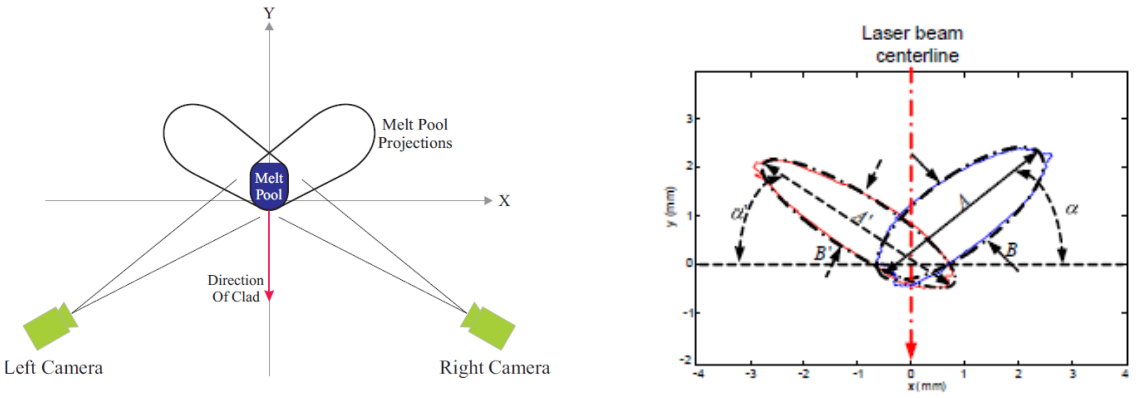
Du fait de l'aspect projectif du processus de formation d'images par un capteur vidéo, l'utilisation d'une seule caméra ne permet pas de déterminer la position en Z du bain liquide. *La stéréovision*, est basée sur le procédé de perception humaine : l'obtention du relief à partir de deux points de vue légèrement différents. La mesure par stéréovision est également appelée photogrammétrie ou vidéogrammétrie[23] [39]

La mesure de la distance entre les caméras et les points de la scène revient à une simple *triangulation* entre ces trois éléments. Cependant, cette triangulation ne devient possible que lorsque chaque point de la scène est projeté sur chaque image avec une position connue. Les deux images (ou plus) de la scène sont acquises avec des points de vue différents, ce qui a pour effet de créer une disparité géométrique entre elles. La mesure de cette disparité est réalisée en déterminant les correspondances entre chaque image qui représentent la visibilité d'un même point de la scène dans les images acquises. Des informations détaillées sur le concept de stéréovision peuvent être trouvées dans [52].

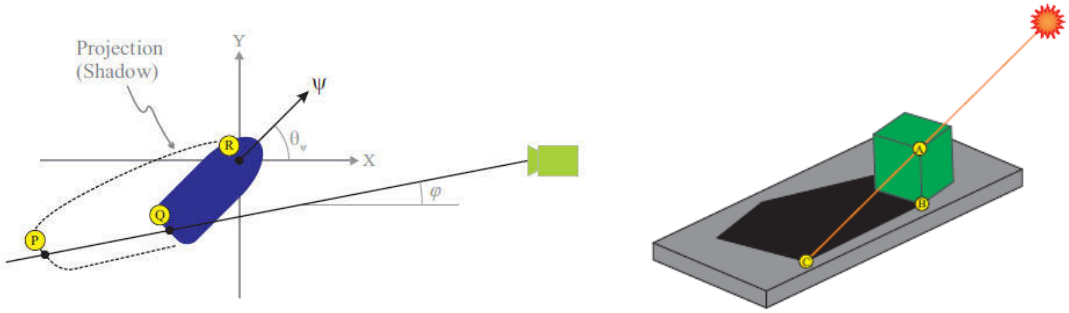
La stéréovision est une des techniques les plus répandues et un aspect très abouti de la vision par ordinateur, tant par les diversités des applications (aide à la conduite, construction de carte, navigation pour la robotique autonome, modélisation d'environnements,…etc) [37] [53] [54]. *Malheureusement, il y a peu de travaux sur la mesure de la position en Z dans le procédé de projection laser*. Certains auteurs utilisent le même Z quel que soit les paramètres procédés employés [5].

[23] La photogrammétrie est utilisée lorsque les traitements sont effectués en temps différé et la vidéogrammétrie, lorsqu'ils sont effectués en temps réel.

Les travaux sur le procédé de projection laser pulsé du Centre National de la Recherche Canada (CNRC) à Ontario (Canada) travaillent sur des techniques de triangulation (Figure II.11). [29] utilise deux caméras latérales. L'image résultante contient une approximation de la projection du bain par une ellipse sur les deux caméras. Grace à un *apprentissage par réseau de neurones* sur les paramètres de l'ellipse (grand axe et petit axe) et l'angle de vue de la caméra, il calcule la hauteur du bain. [43] utilise la technique de reconstruction 3D du *Shape from shading* pour calculer la hauteur du bain. Le principe de la méthode est basé sur l'analyse de la forme de l'ombre propre à la surface du bain. Un certain nombre d'hypothèses doivent donc être formulées afin de pouvoir décrire la forme du bain. *Ces techniques malheureusement, ne fonctionnent que sous certaines conditions*.



Travaux de [29]



Travaux de [43]

Figure II.11 – Quelques travaux du centre CNRC sur la triangulation

Plusieurs autres études proposent des capteurs hors axe, dont certains sont composés de *plusieurs caméras placées autour du bain liquide*, formant un angle avec l'axe z de la tête laser. Par acquisition et traitement de l'image du bain liquide, ceci permet d'effectuer un calcul de triangulation et donc d'obtenir la mesure en Z. Ces techniques conduisent à un *encombrement* important de l'ensemble capteur et tête optique. Si les mouvements de la tête sont multi-directionnels, il faut alors disposer d'au moins deux caméras, ce qui rend le dispositif encore plus *complexe*. De plus, ce principe est *difficile à mettre en œuvre* dans le cadre de la fusion de poudre pour laquelle la buse de projection obstrue la vision du bain. Mazumder [44] propose une solution de triangulation constituée de trois caméras pour le contrôle de la hauteur (appelé POM : Precision Optical Manufacturing) (Figure II.12). Cependant, aucun détail sur les algorithmes utilisés pour l'extraction de la hauteur n'est donné, en raison du *brevet* déposé.

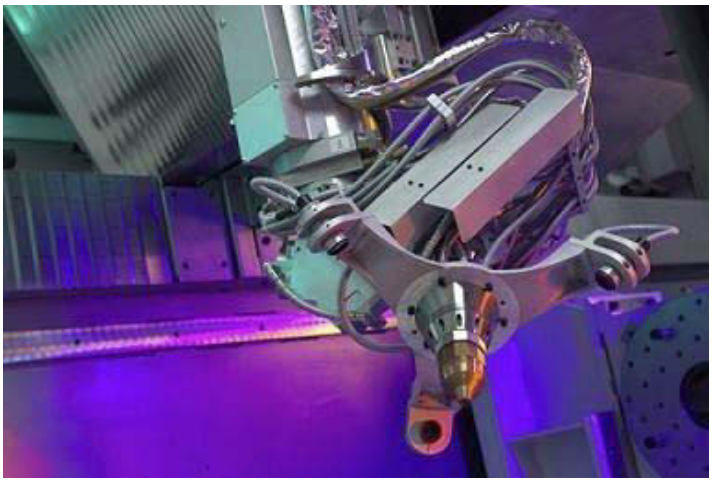


Figure II.12 – Système POM (Source : POM Group)

II.2.4 Synthèse des limites des systèmes existants et propositions de développement

De nombreux capteurs permettent de récupérer les signaux caractéristiques produits par le bain liquide pour le contrôle/commande du procédé. Ils se différencient par les grandeurs physiques du bain qu'ils permettent de mesurer, de la sensibilité, de la résolution, de la dynamique et du coût.

Les capteurs de température sans contact semblent particulièrement adaptés aux environnements hostiles, comme dans le cas de la projection laser. Cependant, *l'incertitude au sujet de l'émissivité du bain observé et de ses variations avec la longueur d'onde, la température, et parfois même l'angle d'émission constitue généralement une source majeure d'incertitudes sur la mesure de température* [25] [26] [55]. Ces sources d'incertitudes bien qu'importantes, sont pourtant généralement sous-estimées, mal évaluées, voire complètement négligées. De ce point de vue, de brusques changements d'émissivité, liés soit à un changement de composition, soit à un changement d'orientation ou d'état de surface, et le manque de données fiables de l'émissivité des métaux, peuvent constituer des obstacles à l'utilisation de la pyrométrie à la mesure de température vraie du bain liquide. *Le fait de s'affranchir de l'émissivité implique des méthodes complexes et coûteuses à la fois en argent et en temps de calcul. De plus le prix nettement élevé des caméras thermiques en dessus de 2µm (10 à 200K€ en fonction de la caméra, de l'objectif et du logiciel associé choisi*[24]*) est un vrai obstacle pour leur utilisation et surtout dans notre contexte où le prix du système joue un rôle important dans l'industrialisation de la machine. Il faut ajouter à cela le fait que ces caméras thermiques n'autorisent pas des fréquences d'acquisitions élevées* [56] *pour une commande en temps réel du procédé de projection laser*.

Compte tenu de toutes les observations mentionnées ci-dessus, et les contraintes qui nous étaient imposées (souci d'économies, fiabilité, temps réels et encombrements), *les mesures de températures sans contact sont donc à proscrire*. De même la vision active est difficilement utilisable sur notre procédé. Certaines techniques à base de lumière structurée seraient envisageables mais la nécessité d'un traitement temps réel et le caractère encombrant du système rend ces méthodes difficilement adaptables.

En résumé et, par rapport à nos contraintes, *nous avons donc choisi de nous orienter vers la vision passive (dans une bande qu'on verra par le choix de la caméra) associée aux algorithmes de traitement d'image, pour obtenir des informations sur les caractéristiques géométriques du bain liquide*. Ces mesures seront ensuite utilisées dans le contrôle/commande du procédé de projection laser. En effet, on se rend aisément compte de l'étude bibliographique l'émergence et l'intérêt porté à la vision passive pour le contrôle qualité [37] [53] et la commande des procédés lasers [54] [57].

[24] Source FLIR Systems : www.flir.com

L'avènement des caméras et des ordinateurs, permet d'élaborer un système de vision artificiel qui semble être un compromis entre coût raisonnable du système global et précision. De plus, un système de vision permet des mesures spatiales (2D et 3D), temporelles et spectrales, ce qui pour un procédé comme la projection laser permet d'envisager *des mesures à la fois de la géométrie du bain et des champs de température grâce à un étalonnage thermique* (capteurs 2en1 !).

II.3 Description du poste expérimental de projection

Voici ci-dessous une photo (Figure II.13) du poste expérimental de projection laser (nommé *LIMOGES PRECISION*), sur lequel s'est déroulé l'ensemble des expérimentations. Il répondait bien aux besoins du laboratoire en termes de l'étude des phénomènes physiques mis en œuvre au cours de l'interaction laser-matière et de l'analyse du système en boucle ouverte.

Ce poste est constitué d'un *portique 3 axes* (X, Y et Z) commandé par une commande numérique (CN), d'un *distributeur de poudre, d'une buse de projection, d'une tête laser* qui accueille la fibre optique provenant du laser, ainsi que d'un bac de récupération de poudre sur lequel peuvent être fixés les différents substrats. Un système d'aspirateur installé derrière le bac de récupération permet d'éliminer la fumée générée pendant la fabrication.

Notons que ce poste expérimental ne possède aucune enceinte hermétique permettant d'être en atmosphère neutre et/ou contrôlée. C'est pourquoi, la buse de projection comporte un cône permettant une protection gazeuse locale en plus de la protection interne (au centre du cône).

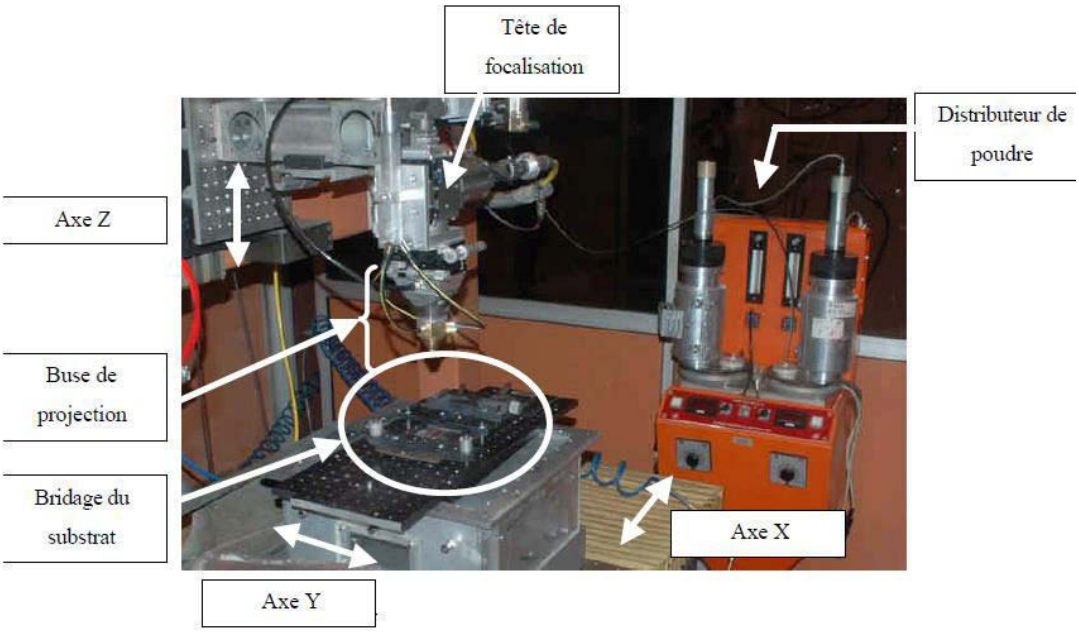


Figure II.13 – Portique LIMOGES PRECISION

On présentera dans cette partie l'ensemble des éléments constituant ce poste et les matériels nécessaires à l'étude du système, de l'instrumentation et de contrôle/commande. Nous parlerons plus loin dans ce chapitre, des éléments rajoutés et des modifications apportées à la configuration d'origine de ce poste pour intégrer les systèmes de mesure à base de caméra pour le contrôle/commande du procédé (boucle fermée).

II.3.1 Le laser

Le laser utilisé est un laser Nd:YAG HL3006 (*pompé par lampes flashes*), de la marque TRUMPF, émettant à la longueur d'onde *1,064 μm*. C'est un laser continu dont la puissance est comprise entre

3 et 3000W. Le faisceau laser en sortie de la cavité est dirigé vers la tête laser de la marque TRUMPF à l'aide d'une fibre multimode d'un diamètre de *600μm*. Le faisceau sortant de la fibre est divergent, c'est pourquoi une *lentille de collimation* d'une distance focale de 200mm est utilisée afin de paralléliser les rayons (Figure II.14). Enfin, une *lentille de focalisation* permet la concentration du faisceau laser. La longueur focale de la lentille de focalisation est également de 200mm, ce qui permet d'obtenir un rapport de grossissement égale à 1, et un faisceau laser de 600 μm de diamètre au plan focal du faisceau laser.

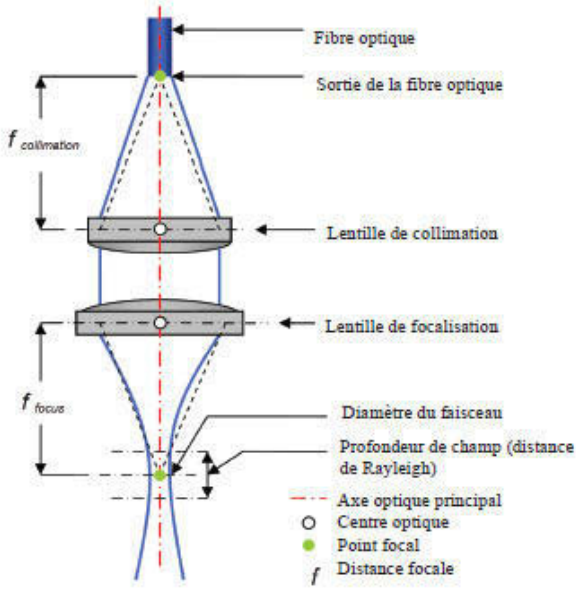


Figure II.14 – Dispositif de collimation et de focalisation du faisceau laser en sortie de fibre optique

II.3.2 La table de déplacement

Le déplacement de la pièce sous le faisceau laser est effectué par trois *servomoteurs* de la marque ALSTHOM PARVEX, pilotés par des variateurs à transistors et encodeurs circulaires. (Tableau II.1). Le guidage est assuré par des *règles linéaires à billes sur coussin d'air* (alimentation en air comprimé).

	Vitesse d'avance maximale	Accélération	Course	Moteurs	Constante de temps mécanique
Axe X	20 m/min	5 m/s^2	600mm	Moteur synchrone sans balais	1.82 ms
Axe Y	20 m/min	5 m/s^2	900mm		
Axe Z	20 m/min	5 m/s^2	500mm	Moteur synchrone avec frein	2.15 ms

Tableau II.1 : Spécifiés machine

Au niveau logiciel, un logiciel développé par la société ACNS, offre une Interface Homme Machine (*IHM*) de contrôle qui permet de communiquer avec la commande numérique (NUM 1040 GP) via le protocole de communication de *port série UNITELWAY*.

Le mouvement de la pièce s'effectue dans l'axe X et Y, tandis que la tête laser et la buse de projection se déplace sur la verticale (Axe Z) en perpendiculaire par rapport à la pièce.

II.3.3 Poudre, distributeur de poudre et buse de projection

La poudre utilisée dans le cadre de ce projet est un *alliage de titane Ti-6Al-4V (ou TA6V[25]).* C'est une poudre couramment employée pour la fabrication de pièces de haute performance, particulièrement dans le domaine de l'aéronautique et du spatial. En effet, c'est une poudre qui a une excellente résistance à la corrosion et de bonnes propriétés en fatigue et fluage.

Le distributeur utilisé est un PLASMA TECHNIK Twin 10C de marque SULZER METCO, constitué de deux bacs de poudre, qui peuvent être utilisés individuellement ou simultanément, permettant de délivrer un débit de *1 g à 10 g par minute*. Son fonctionnement, décrit sur le schéma de la Figure II.15, est le suivant : la poudre, stockée dans le réservoir, tombe dans une rainure d'un plateau rotatif, puis par différence de pression, la poudre est aspirée de cette rainure par un racleur et envoyée dans la buse de projection par des tuyaux antistatiques. *Le réglage du débit de poudre s'effectue par un simple réglage de la vitesse de rotation du plateau*. L'écoulement peut être modifié par la variation de pression et du débit du gaz porteur (Argon, Hélium, Azote…).

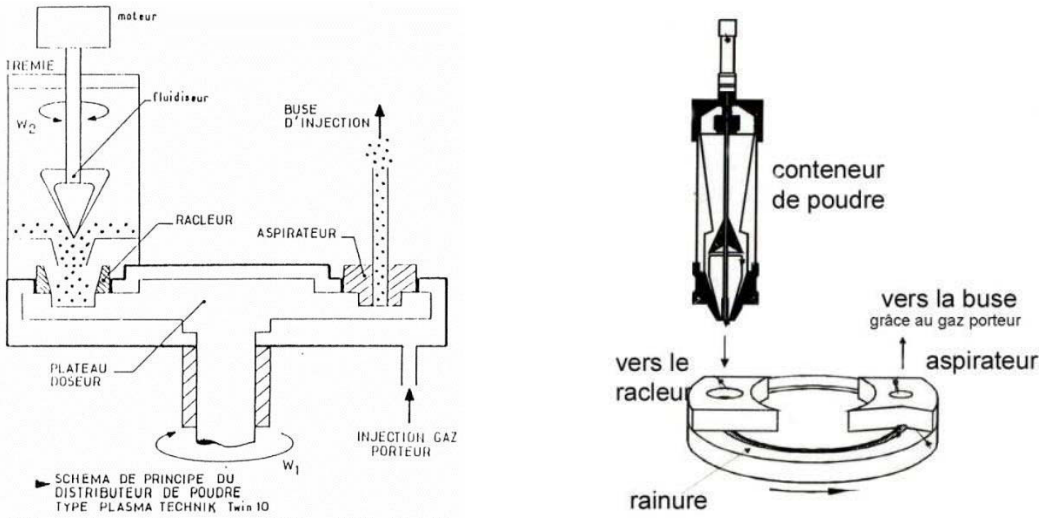


Figure II.15 – Schéma de principe du distributeur de poudre PLASMA TECHNIK (Source : Sulzer Metco).

La buse utilisée est une *buse coaxiale* constituée de trois cônes gigognes au travers des quels sont amenés le faisceau laser et le faisceau de poudre qui sont coaxiaux et dirigés selon l'axe Z de construction (Figure II.16).

[25] La poudre de Ti-6Al-4V utilisée est sphérique, et a été élaborée par atomisation gazeuse. Selon le fournisseur (TLS Technik), sa répartition granulométrique est centrée entre 45 µm et 75 µm.

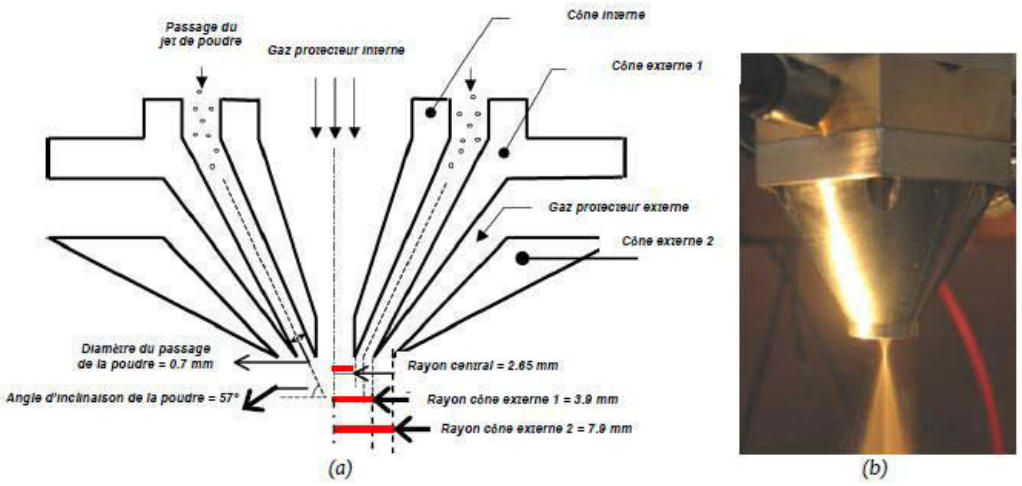


Figure II.16 – Schéma de principe (a) et image (b) de la buse coaxiale utilisée au cours de cette thèse.

L'alimentation en poudre de la buse s'effectue par trois tuyaux antistatiques espacés de 120° et reliés directement au distributeur de poudre. Cette triple injection de poudre permet de la répartir uniformément dans l'espace inter-cônes.

La poudre portée par un *gaz neutre* (hélium ou argon[26]) passe entre les deux premiers cônes et se trouve alors répartie autour du faisceau laser selon un cône. Le débit du *gaz porteur* influe sur la vitesse des particules de poudre, sur la densité (concentration volumique des particules) ainsi que sur l'homogénéité du jet de poudre.

La buse est équipée d'un *système de refroidissement* à circulation d'eau qui permet d'éviter tout échauffement. Un flux de gaz protecteur[27] (argon ou hélium) est apporté par la buse, d'une part par son centre au niveau du passage du faisceau laser (protection interne), et d'autre part entre le deuxième et le troisième cône (protection externe). Le gaz central de protection permet également de jouer sur la position du plan focal poudre et la forme du faisceau de poudre.

Notons que lors de nos essais, on était confronté à quelques défauts éventuels tels que le bouchage ou le décentrage de la buse qui conduisent à un défaut du procédé.

II.4 Développement d'un moyen de caractérisation des buses de projection

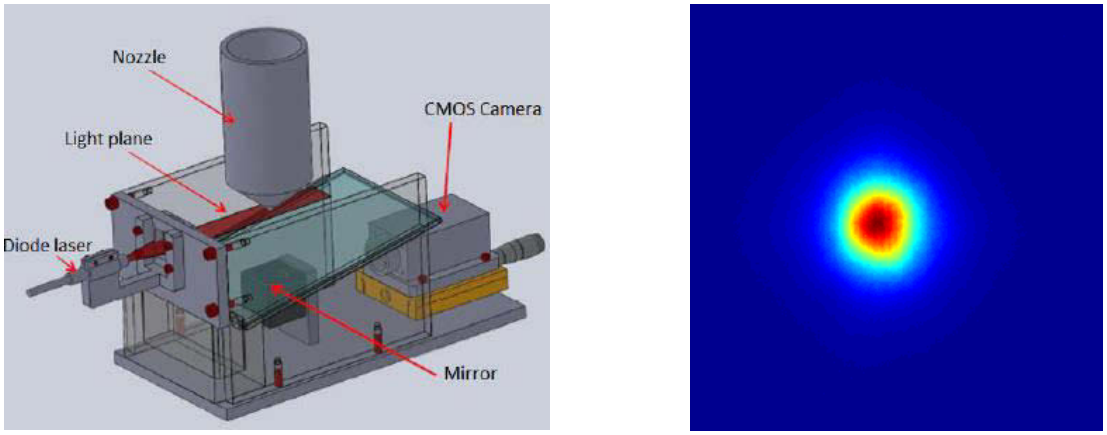
II.4.1.1 Caractérisation du jet de poudre

La distribution de la poudre par la buse conditionne la qualité du dépôt (stabilité du débit de poudre, focalisation du faisceau de poudre projeté) et le rendement de fusion. Ceci comprend l'ensemble des éléments utilisés pour la projection de la poudre, c'est à dire : Le système de distribution de poudre et la buse de projection. Pour monter ceci, nous avons réalisé des *mesures de profil de jet de poudre* par un dispositif optique présenté ci-après (Figure II.17). Une diode laser He-Ne de longueur d'onde 630 nm est mise en forme par une lentille cylindrique pour avoir une lumière plane rectangulaire de 20 mm de large et 200 µm de haut avec une distribution laser uniforme. Cette lumière laser traverse verticalement le nuage de poudre et une caméra CMOS, dotée d'un filtre passe bande interférométrique à 630 nm, capte l'image du plan éclairé (sections horizontales du jet de poudre)

[26] L'argon reste le gaz le plus couramment utilisé pour les applications laser du fait de sa neutralité chimique et de sa densité supérieure à celle de l'air. Il est par ailleurs plus économique que l'hélium.
[27] La protection gazeuse locale ou globale vise à limiter, voire supprimer l'oxydation superficielle ainsi que la contamination en oxygène des pièces, phénomène particulièrement critique dans le cas du TA6V.

grâce à un miroir réflectif placée à 45° et une plaque en verre qui protège le dispositif optique de la poudre.

On réalise des mesures depuis l'extrémité de la buse jusqu'à une distance d'environ 15mm par pas de 0.5mm. Pour chaque plan, nous avons enregistré 100 images, qui sont ensuite traitées sous *MATLAB*. Les analyses présentées dans cette partie, ont été faites sur la poudre Ti-6Al-4V (granulométrie 25-45 µm et 45-75 µm) pour des débits massiques variant de 1 g/min à 4,5 g/min.

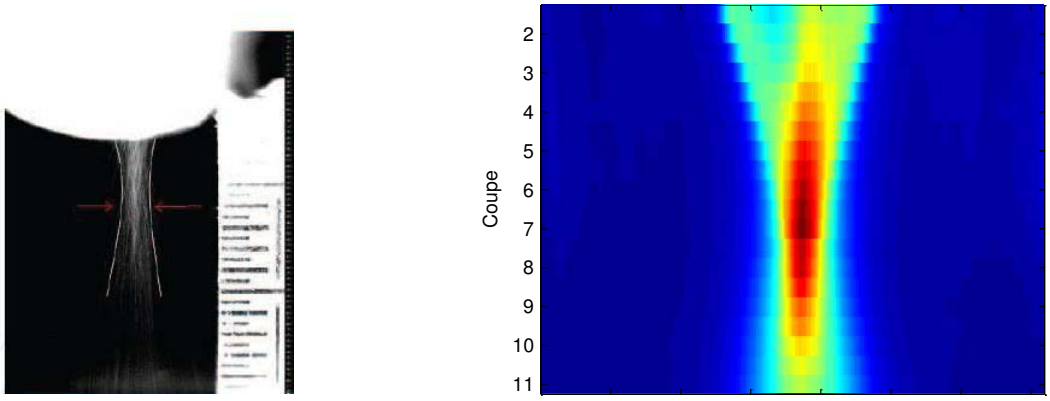


(a) (b)

Figure II.17 – Analyse de la distribution spatiale du jet de poudre : (a) Dispositif expérimental, (b) Exemple d'image

Cette expérience nous a permis d'étudier la distribution du jet de poudre (2D et 3D), la position et le diamètre du jet de poudre au niveau du plan focal, et une estimation du rendement de fusion en fonction de la distance buse-substrat [58].

La forme conique de la buse de projection permet d'obtenir un *jet de poudre qui converge jusqu'au plan focal*, caractérisé par une concentration en particules maximale (Figure II.18a). La Figure II.18b montre la forme du jet de poudre obtenue après traitement[28] pour le cas du TA6V de granulométrie 45-75 µm. Le débit massique de poudre est de 2.5 g/min, le débit de gaz de protection est de 5.5 l/min et le débit de gaz porteur 2l/min.



(a) (b)

Figure II.18 – La forme du jet de poudre : (a) Capture de l'image du jet de poudre, (b) Distribution 2D (x, z) du jet de poudre

[28] Le traitement appliqué à cette figure est un assemblage de coupes à différents Z cumulés suivant l'axe X (direction du faisceau laser)

Les études menées au PIMM dans la cadre de la thèse [6] sur le jet de poudre ont permis de *caractériser expérimentalement* (par la méthode de la plaque percée[29]) la distribution massique des particules du jet de poudre par une distribution quasi-gaussienne D_m^* exprimé en $g.m^{-2}.s^{-1}$ de la forme :

$$D_m^* = nD_m^0 exp\left(-n\frac{(x^2+y^2)}{r_{jet}^2}\right) \quad \text{(II.4)}$$

Où : D_m^* est le débit massique surfacique local, n est un paramètre de distribution à déterminer expérimentalement, $D_m^0 = \frac{D_m}{s}$ est le débit massique surfacique moyen (D_m est le débit massique moyen et s la surface) et r_{jet} le rayon du jet de poudre.

Pour le vérifier, nous avons représenté le profil de distribution du jet de poudre (Figure II.19) avec les mesures faites par *traitement d'images* du jet de poudre éclairé par laser avec le modèle *analytique* donnée par l'équation (II.4).

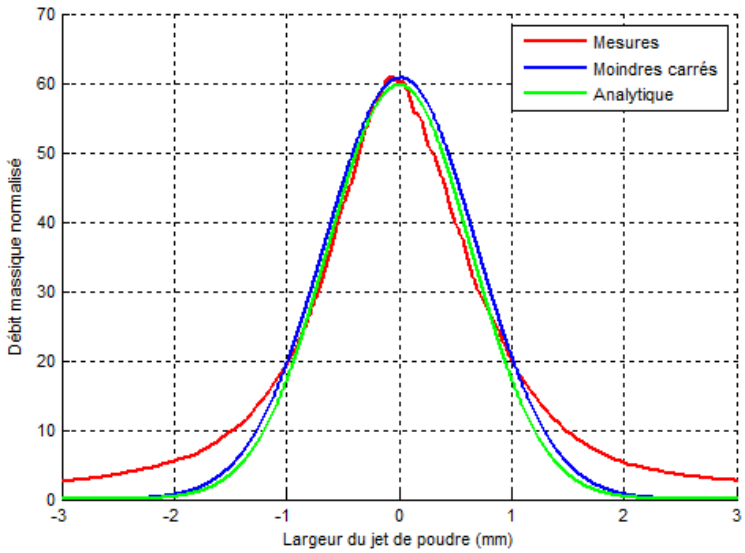


Figure II.19 – Distribution du jet de poudre obtenue par analyse d'images et approximation analytique (n=5, rjet=2mm et Dm=2.5g/min)

On constate que, *le profil se rapproche d'une distribution gaussienne*. A cette distance, le profil de distribution issu d'analyse d'images concorde avec le modèle analytique.

II.4.1.2 Position du plan focal

En faisant l'hypothèse, que le diamètre du jet de poudre est la largeur à mi-hauteur de la gaussienne et en traçant ce diamètre en fonction de la distance, on peut tracer *la caustique du jet de poudre* (Figure II.20).

[29] Dans cette méthode, la distribution massique du jet de poudre est caractérisée en mesurant la masse de poudre reçue à travers une plaque percée d'un trou de 0,3 mm pendant un temps donné. Cette mesure est répétée en différents endroits du plan de la plaque perpendiculaire à l'axe de la buse, en balayant les axes x et y.

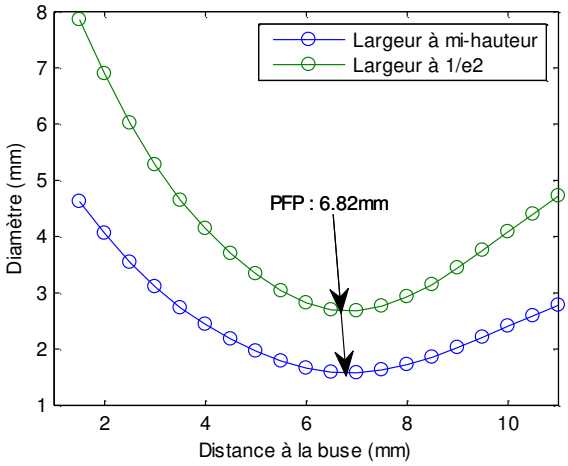


Figure II.20 – Caustique du jet de poudre

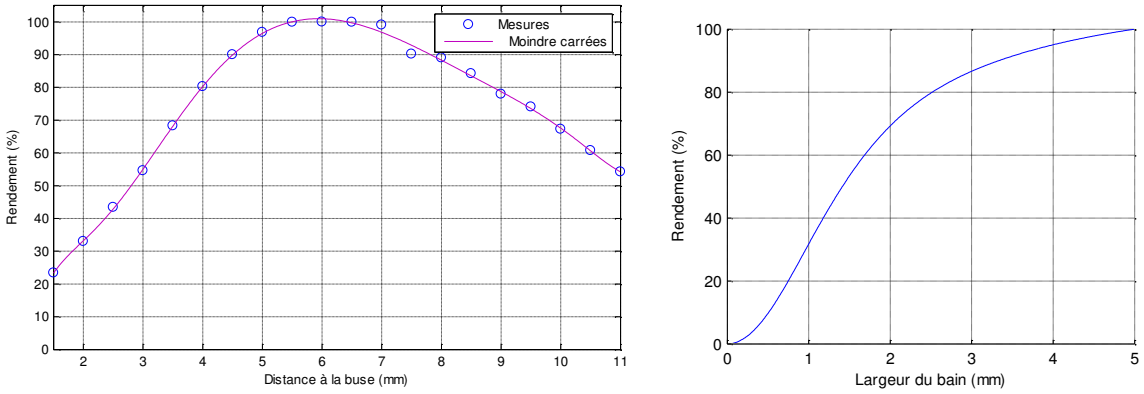
Le plan focal poudre (PFP) de l'écoulement de la Figure II.20 se situe à 6.82 mm de la sortie de buse avec un diamètre à mi-hauteur de 1,57 mm. En considérant les *incertitudes*, tant sur les mesures expérimentales que sur les résultats numériques, la position du plan focal poudre semble validée. En effet, dans les expériences réalisées par [6], il a été mesuré une distance focale de 6±0,1 mm et un diamètre du jet de poudre de 2±0,2 mm. La caustique du jet de poudre prédit donc une position du plan focal trop haute avec un diamètre de jet plus fin. Cet écart peut s'expliquer par la méthode utilisée expérimentalement qui consiste à modifier le débit massique de poudre afin de mieux visualiser la position du plan focal. Or une modification du débit massique tend à faire remonter ou descendre la position du plan focal et à modifier son diamètre [5].

II.4.1.3 Evaluation du rendement de fusion

A partir des images du jet de poudre, on peut *estimer le rendement de fusion*[30] *entre le jet de poudre et le bain liquide* suivant la distance du bain liquide vis à vis du bas de la buse. On fait l'hypothèse que le bain liquide peut être assimilé à un cercle de diamètre fixé. On procède alors de la manière suivante : le cercle simulant le bain de fusion est utilisé comme masque sur les coupes. Pour chaque coupe, on centre et on met à l'échelle le cercle. Seuls les pixels inclus dans le cercle sont conservés (simulant la poudre qui tombe dans le bain de fusion). En faisant la somme des pixels conservés, on obtient une courbe d'estimation du rendement de fusion en fonction de la position en Z du bain.

La Figure II.21a présente *la courbe de rendement simulé* pour un bain de 2mm et la Figure II.21b la variation du rendement en fonction de la largeur du bain au point focal poudre (6.82mm).

[30] Ratio de la quantité de matière reçue par la zone fondue sur la quantité de matière totale projetée.



(a) (b)

Figure II.21 – Le rendement de fusion entre le jet de poudre et le bain liquide : (a) Courbe de rendement simulé pour un bain de 2mm, (b) Courbe du rendement en fonction de la largeur du bain liquide au point focal poudre

On constate que le rendement augmente lentement depuis l'extrémité de la buse jusqu'à un maximum avant de chuter (Figure II.21a). Le meilleur rendement est obtenu au plan focal poudre, c'est à-dire pour une position du jet plus étroit et plus concentré. La Figure II.21b montre que le rendement augmente avec la taille de la zone fondue et tend vers une valeur asymptotique. *L'augmentation du rendement d'interaction avec la taille du bain est liée à un facteur purement géométrique qui dépend du rapport des sections entre le bain liquide et le jet de poudre*. Des mesures faites par [6] ont montré que la valeur asymptotique du rendement d'interaction est de 80% pour le Ti-6Al-4V.

Comme on l'a mentionné auparavant, il est intéressant de remarquer que, sous certaines conditions, le processus de fusion peut conduire à une certaine *autorégulation du processus* que l'on peut montrer à partir de ces courbes de rendement de fusion [2].

La Figure II.21a montre un maximum de rendement de fusion (donc un maximum de matière fusionné pour un débit de poudre donné) au plan focal poudre (à environ 6mm du bas de la buse). Si on place le point de fonctionnement un peu en dessous de 6mm en plaçant la buse à une distance un peu inférieure à 6mm du substrat (par exemple ici à 5 mm), on aura alors l'effet suivant au cours du processus de fabrication :

- Si la hauteur du cordon a tendance à être légèrement inférieure à Dz programmé (la hauteur attendue pour les paramètres d'entrées), le bain va avoir tendance à s'éloigner de la buse au fur et à mesure de la superposition des couches. Sur la courbe, on constate alors que le rendement aura tendance à augmenter, ce qui doit permettre d'augmenter la hauteur de la couche et donc de revenir au point d'équilibre.
- Si la hauteur du cordon a tendance à être légèrement supérieure à Dz programmé, le bain va avoir tendance à se rapprocher de la buse au fur et à mesure de la superposition des couches. Sur la courbe, on constate alors que le rendement aura tendance à diminuer, ce qui doit permettre de diminuer automatiquement la hauteur de la couche et donc de revenir au point d'équilibre.

On constate donc que la configuration de la buse permet une certaine autorégulation de la position du bain vis à vis de l'extrémité de la buse, c'est à dire en fait une autorégulation de la hauteur des couches. C'est ce qui permet de construire des pièces de grande hauteur sans avoir à connaître très précisément le Dz à programmer. Bien entendu, ce mécanisme d'autorégulation ne peut fonctionner que dans une plage très limitée de variation de la distance bain-buse. A partir du moment où cette distance dépasse ici 6mm, le processus s'inverse et le défaut ne peut alors que s'accroitre.

II.5 Mise en place de l'installation de projection laser

Au travers des deux premiers chapitres, nous avons présenté le procédé de projection laser, les paramètres impliqués dans le procédé et les capteurs retenus pour la mesure du bain liquide. Nous nous proposons dans cette partie, de mettre en adéquation les trois parties précédentes, c'est à dire de présenter les moyens, les méthodes et les outils que nous avons utilisés dans le cadre de cette thèse.

II.5.1 La chaine d'acquisition et de traitement de données

Les modules d'acquisitions et de traitements des données ont été développés dans l'environnement *MATLAB et LabVIEW*. Ils se présentent sous forme d'interfaces permettant de piloter le procédé et de recueillir des informations en provenance de ce dernier (des cartes d'entrée/sorties analogiques ou numériques, capteurs,…etc). Ils seront utilisés par la suite pour gérer les différentes phases de l'expérimentation :

- Les étalonnages
- L'étude du système en boucle ouverte (identification des modèles procédé : Chapitre III)
- Et l'étude du système en boucle fermée (mise en place d'un dispositif de commande : ChapitreIV)

Ces systèmes de mesures se distinguent donc : par leur finalité (analyse, modélisation/identification, ou contrôle/commande) ou par le moment où intervient la mesure par rapport au processus de fabrication (avant, pendant ou après la fabrication).

Une illustration schématique de l'interconnexion entre les différents équipements est montrée sur la Figure II.22. Elle présente également l'implémentation de ce système dans l'environnement du poste expérimental de projection laser (LIMOGES PRECISION).

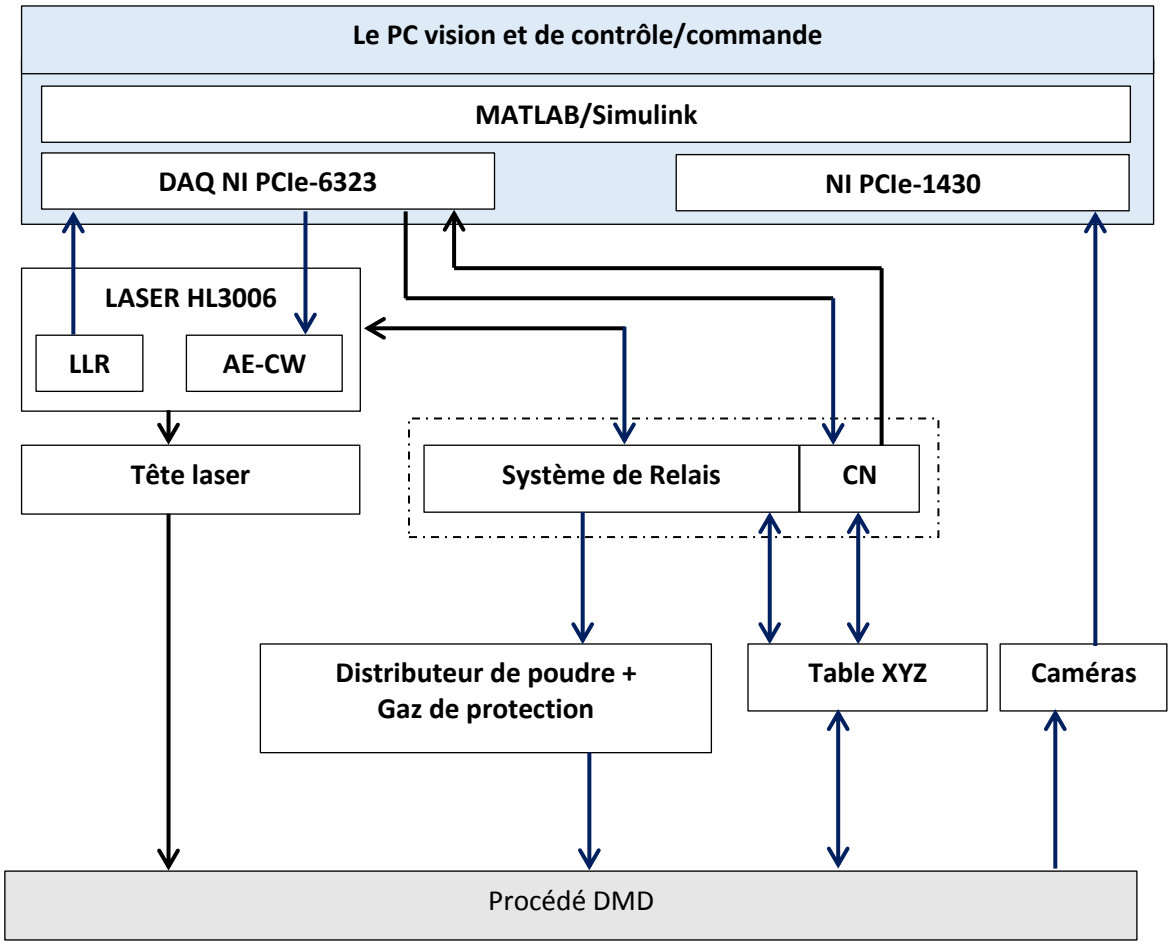


Figure II.22 – Flux d'information entre les différents modules de la chaine d'acquisition et de commande

Une armoire électrique contenant les variateurs numériques pour l'actionnement des servomoteurs (la CN : commande numérique) et plusieurs relais électromagnétique (12V) qui servent à *commander l'obturateur du faisceau, le distributeur de poudre et l'électrovanne de la protection gazeuse*. La synchronisation des commandes et des mesures est ainsi réalisée directement via un programme écrit en code G. Les caméras, associées à la carte d'acquisition NI PCIe-1430 – Dual-Channel Camera Link – de National Instruments, sont synchronisées par une horloge externe délivrée par la carte d'acquisition NI PCIe-6323[31] qui permet aussi l'acquisition et le contrôle simultané et en temps réel des E/S du système.

La tâche d'acquisition et du traitement d'images sont au cœur de notre application et prennent un certain temps. Ce temps dépend du matériel (la caméra et la carte d'acquisition) et l'unité du traitement utilisée. Pour avoir un *système d'acquisition en temps réel*, un ordinateur de type PC a été acheté pièce par pièce et assemblé pour ce type d'application. Il s'agit d'un *PC industriel destiné au prototypage rapide des applications temps réel.*

[31] Cette carte d'acquisition de données (DAQ : Data AQuisition) offre un niveau de performances avec le débit élevé du bus PCI Express (250 Mo/s), ainsi qu'un driver (NI-DAQmx) et des logiciels d'acquisition de données optimisés pour le multicœur et le temps réel. Elle possède 32 entrées analogiques (250 kéch./s, résolution de 16 bits, ±10 V), 4 sorties analogiques (900 kéch./s, résolution de 16 bits, ± 10 V), 48 E/S numériques, 4 compteurs/timers 32 bits (pour les fréquences d'échantillonnage pour les boucles de régulation, le comptage d'événements, etc) (Source : www.ni.com).

Au niveau matériel, ce PC possède les caractéristiques suivantes : Carte mère ASUS Rampage III Extreme+Processeur INTEL Core i7 990X Extreme Edition avec 12Mo de mémoire cache[32]+Memoir vive de 6 Go/ 1600 Mhz/CAS 7/ XMP+Carte graphique ASUS EAH5770 CUCORE/2DI/1GD5/A avec Chipset graphique ATI Radeon HD 5770 et 1Go de mémoire vidéo-PCI-Express 2.0/ 16x+2 Disque Mémoire 2,5'' SSD SATA III.

Au niveau logiciel, le PC est équipé de MATLAB qui dispose de son propre *noyau temps réel*[33] et est adapté aux applications développées dans l'environnement MATLAB/Simulink et les boites à outils Real Time Windows Target et *XPC Target*[34] de Mathworks[35]. Vis à vis de LabVIEW de National Instrument utilisé pour l'acquisition de signaux, MATLAB offre toutes les possibilités en termes de *développement, d'intégration, d'optimisation et de mise en forme des données*. De conception modulaire et évolutive, cet environnement constitue un outil indispensable pour l'identification de modèles du procédé de projection laser (voir Chapitre III) et la mise en place de dispositifs de commande (voir Chapitre 4). Sa configuration offre à l'utilisateur un environnement multifenêtres et multitâche qui permet aisément de gérer les tâches suivantes :

- *Tâches d'entrées/sorties* : permettent d'accéder aux données externes fournies par des capteurs (gestion et synchronisation des caméras), ou de générer des commandes aux actionneurs (puissance/vitesse) par l'intermédiaire de cartes d'entrées/sorties ;
- *Tâches de sauvegarde* : permettent de stocker l'état du système (entrées-sorties) afin de pouvoir être utilisé a posteriori pour l'analyse de son fonctionnement et d'identification ;
- Tâches de traitement : constituent le cœur de l'application. Elles peuvent être considérées comme des boîtes noires, exécutant des algorithmes issus du traitement du signal, du traitement d'images, et de l'automatique ;
- *Tâches de gestion de l'interface utilisateur* : permettent de présenter l'état du procédé ou de sa gestion à l'utilisateur. Donc, l'utilisateur peut modifier les consignes données ou changer les commandes via un IHM ;
- *Tâches de contrôle/commande :* permettant le contrôle/commande du procédé par l'intermédiaire du programme du contrôleur implémenté de façon logicielle dans le PC.

II.5.2 Le laser

II.5.2.1 La caractérisation du faisceau laser

Des analyses de faisceau laser menées par [2] [5] ont permis de déterminer *la caustique du laser* (son diamètre en fonction du niveau de défocalisation[36]) (Figure II.23c) et sa *distribution spatiale*[37] (Figure II.23a). En sortie de la fibre optique et au plan focal, le faisceau laser présente une distribution homogène (aussi appelé « *top-hat* »). En dehors de ces positions spécifiques, la distribution d'intensité est de type *parabolique* (Figure II.23d).

[32] Ce processeur embarque 6 cœurs logiques multithreadés et cadencés à 3,46 Ghz. Ce processeur est très bien apprécié au niveau du temps d'exécution, aux traitements vidéo, infographie 3D ou autres applications gourmandes.
[33] Le rôle du noyau est de gérer les ressources matérielles et permet aux différents composants, matériels et logiciels, de communiquer entre eux.
[34] Les applications développées peuvent s'exécuter en temps réel et de façon autonome une fois transférées vers le support de stockage de la XPC Target Box par liaison Ethernet avec un PC maitre.
[35] http://www.mathworks.fr/
[36] Ces mesures ont été réalisées à partir de la mesure du diamètre des impacts laser laissés pour un tir de 10ms à 600W sur une plaque d'aluminium anodisé.
[37] La mesure de l'intensité du faisceau a été réalisée avec un analyseur industriel.

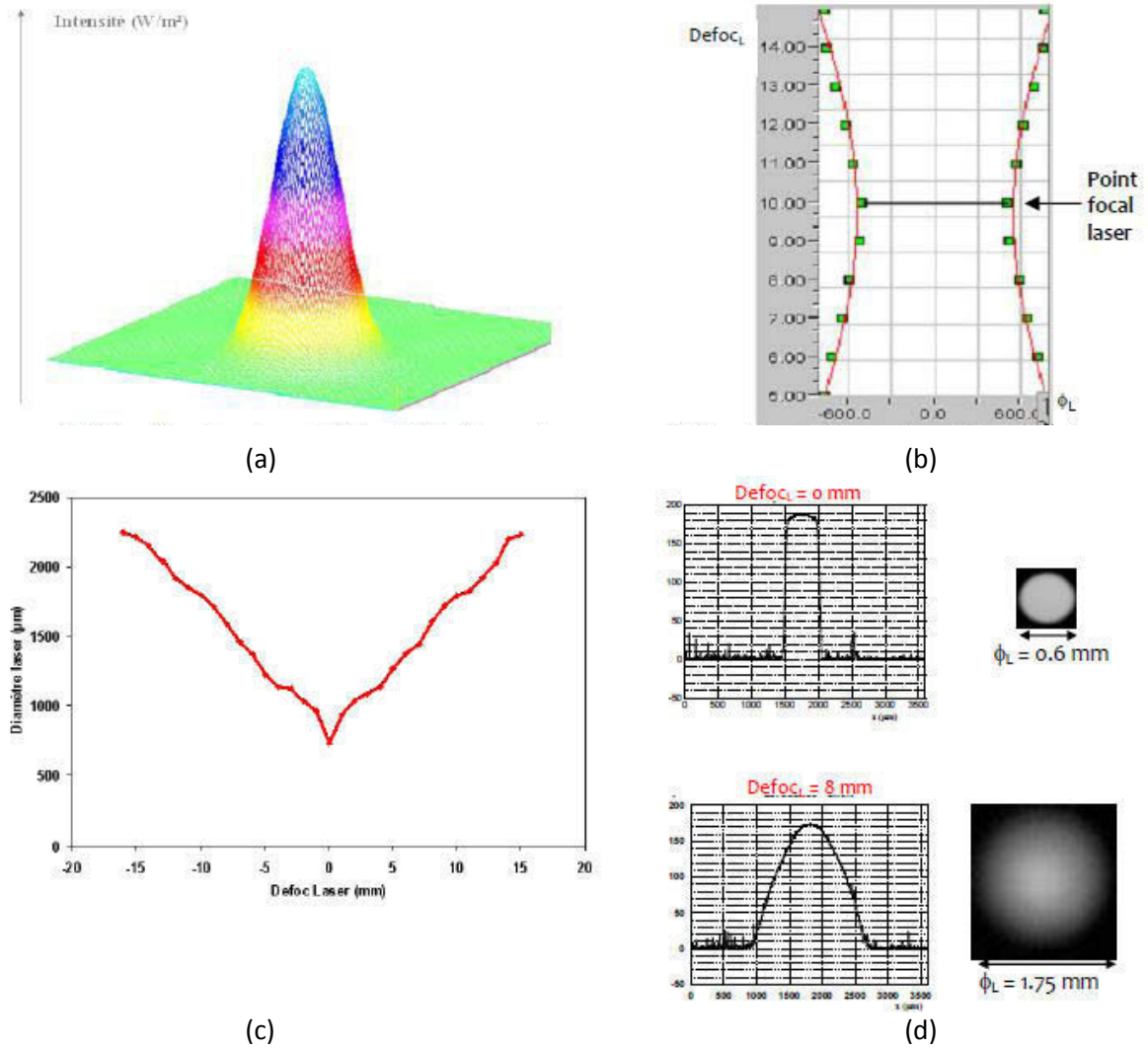


Figure II.23 – Caractéristiques du faisceau laser : (a) Répartition de l'intensité du faisceau laser (b) Caustique du faisceau laser (c) Diamètre de l'impact en fonction de la défocalisation laser (d) Diamètre et répartition énergétique du faisceau laser à DefocL =0 et 8mm

La puissance laser arrivant réellement sur la pièce (après passage dans la fibre, lentilles et tête laser) a été mesurée avec un calorimètre Laser Metrology RLC60 v2.3.

L'analyse calorimétrique à montrer que 97 % de la puissance de consigne est réellement transmise, ce qui représente 3 % de pertes dues à la fibre et aux optiques.

II.5.2.2 Suivi de puissance

Le laser est équipé d'un capteur de puissance et d'énergie monté sur le miroir de renvoi de la construction optique. Une minime partie de la puissance en sortie du laser est prélevée par le miroir de renvoi et injectée dans le capteur. *La mesure de cette fraction du faisceau permet de suivre l'évolution de la puissance laser en fonction du temps* [59]. La prise de mesure se fait par une sortie analogique via connecteur BNC à deux pôles. *La tension présente à cette sortie analogique est proportionnelle à la puissance du faisceau laser (400W/V).*

II.5.2.3 La commande en puissance

Le laser est équipé d'une entrée analogique permettant de définir de l'extérieur la puissance laser pour le dispositif laser à l'aide d'un signal électrique (tension ou courant). L'interface entrée

analogique est réglée à l'usine sur une gamme de tension de *0..10V*. Il est ainsi possible de définir la puissance laser dans une gamme partant de la puissance laser minimale jusqu'à la puissance nominale du laser. L'entrée analogique dispose également d'une sortie sense pouvant être utilisée pour réguler la tension [59].

Les mesures de la puissance du laser (P) par colorimètre sont tracées en fonction de la tension de commande (Ulaser) sur la Figure II.24. *La variation de la puissance du laser peut être considéré comme linéaire par rapport à la tension de commande : P=444Ulaser*

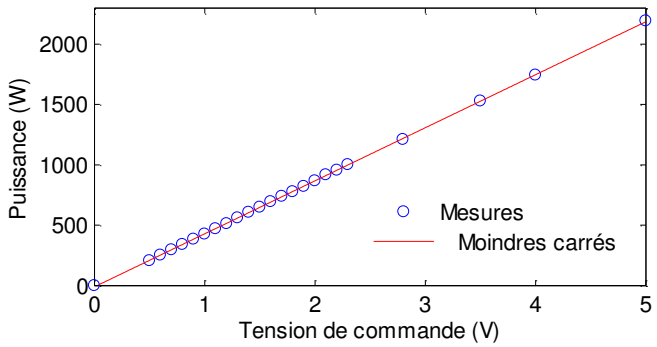


Figure II.24 – Puissance en fonction de la commande en tension

II.5.3 Système de déplacement

II.5.3.1 Mesure de la vitesse de déplacement

Chaque moteur sur un axe (X,Y et Z) est muni d'un capteur de position (*codeur*) qui sert à mesurer la distance parcourue et d'un tachymètre (Figure II.25) .

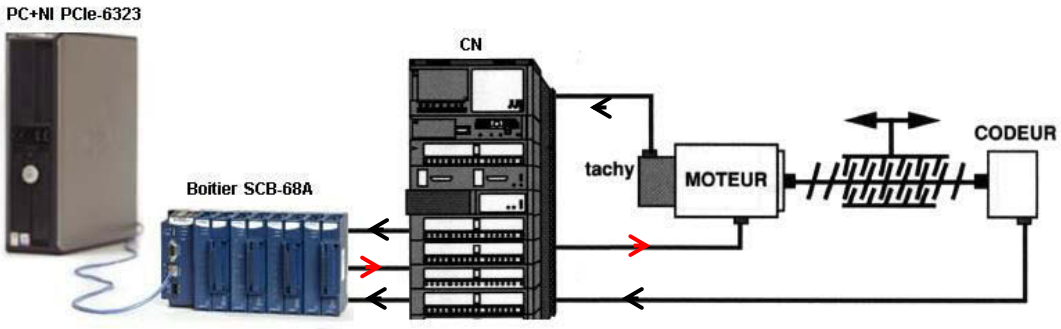


Figure II.25 – Câblage de la CN

Le tachymètre fournit 10 volts, pour une vitesse maxi en multiple de 1000mm/min définie dans la variable E81026 du programme pièce. Par exemple, si E81026=2000 alors la sortie image vitesse est 2000 mm/min pour 10 volts.

II.5.3.2 Commande en vitesse

La CN dispose d'une entrée analogique 0..5V pour la commande en vitesse. Pour que cette commande soit effective, faut d'abord l'activer en ajoutant cette ligne G77H1000 (appel de bloc) dans le code G du programme de la pièce.

La commande en vitesse peut s'effectuer en *mode absolu* ou en *mode relatif*. Pour définir un mode, faut modifier la variable E81020 (=1 : Mode absolue, = 2 : Mode relatif) du programme pièce.

Avec le mode absolu, la vitesse d'avance est réglée indépendamment de la vitesse indiquée dans le programme pièce. La valeur de consigne (entrée analogique) permet d'ajuster la vitesse d'avance entre les valeurs minimale et maximale indiquées dans la ligne E81024 du programme pièce.

Dans le mode relatif, la nouvelle vitesse d'avance est indiquée comme un pourcentage de la vitesse indiquée dans le programme pièce. *La valeur de consigne (entrée analogique) en mode relatif ajuste la vitesse d'avance de 0 à 120% de la valeur indiquée dans le programme pièce* (Figure II.26). Par exemple, si la vitesse programmé est 400mm/min, la vitesse d'avance peut être ajustée de 0 à 480mm/min selon la valeur de la consigne.

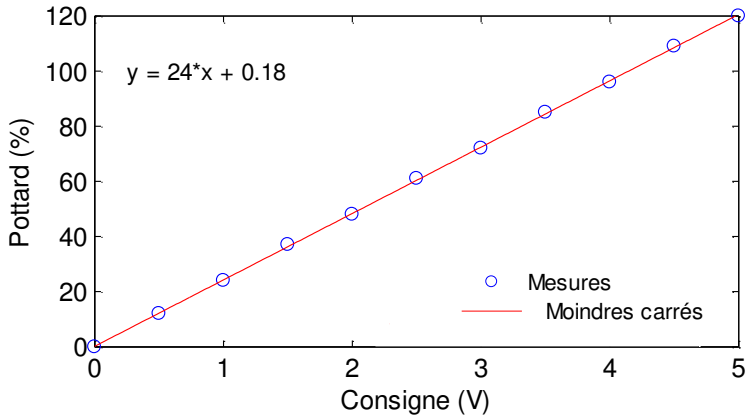


Figure II.26 – La consigne en fonction de la commande en tension

II.5.4 Etalonnage du débit de poudre

Le distributeur de poudre TWIN10C permet la projection de poudres de granulométrie comprise entre 2 et 200µm (poudres fluides et non fluides) au niveau de la surface d'interaction à l'aide d'un gaz porteur (en général de l'argon). Bien que le débit massique dépende essentiellement du plateau de dosage (taille de la rainure) et de sa vitesse de rotation, *un étalonnage est primordial* avant toute série de manipulations car différents facteurs annexes peuvent modifier (limiter) la valeur de débit massique. C'est le cas de [6] :

- La température et l'hygrométrie ambiante
- La qualité de la poudre : les poudres étuvées et sphériques ont une meilleure coulabilité que les poudres non sphériques, et l'histogramme de taille de la poudre (% total = f(diamètre)) modifie le taux de remplissage des rainures
- Le débit du gaz porteur, à un degré moindre

Lors des expériences réalisées, les différents paramètres suivants : débit de gaz porteur et taille de la rainure du plateau ont été fixés, et seule la vitesse de rotation du plateau a été utilisée pour changer le débit massique.

L'étalonnage de la poudre a consisté à tracer la courbe $D_m=f(N_{rpm})$, avec N_{rpm} le nombre de tour par minute du disque du distributeur de poudre.

II.6 Mise en œuvre du capteur de mesure du bain liquide

II.6.1 Introduction

Les capteurs à base de caméra ont été largement développés ces vingt dernières années [53], et permettent aujourd'hui de mesurer de nombreuses grandeurs physiques dont la température et les dimensions du bain liquide. L'ensemble de ces paramètres permet ainsi d'accéder aux paramètres procédés en cours l'élaboration et en temps réel. *La vision par ordinateur apparaît comme la technologie la plus prometteuse pour le contrôle qualité de pièces projetées*. En effet, comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique de la première partie de ce chapitre, l'utilisation des capteurs à base de caméra (vision passive) du procédé de projection laser permet non seulement d'acquérir

des paramètres clefs lors de l'élaboration de pièces pour le contrôle/commande, mais peuvent aussi permettre le suivi « In Situ » de ces paramètres tout au long de la fabrication (traçabilité)[38].

Néanmoins, en tentant d'analyser le processus de f*ormation d'une image lors de la fabrication d'une pièce*, on constate que celui-ci est extraordinairement complexe et fait intervenir, en interaction étroite, un grand nombre de caractéristiques et de phénomènes physiques : des mécanismes de l'interaction laser matière , la forme et la radiométrie du bain en fusion (couleur, émissivité,…), les rayonnements émis par le bain de fusion, la propagation dans l'atmosphère (en lui-même un milieu très complexe qui est le siège de nombreux processus physiques) et enfin le capteur (œil ou senseur optronique) qui reçoit les signaux lumineux. L'enjeu est d'exploiter la réponse de ces capteurs optiques permettant d'obtenir des informations sur la qualité de la pièce en cours d'élaboration. D'une manière générale, l'impossibilité de définir le comportement nominal du système, explique toute la difficulté de la mise en place d'un système de vision pour l'observation du bain.

Les systèmes de vision sont composés principalement d'une source lumineuse, d'un organe de capture d'image (détecteur de lumière), des optiques ainsi que d'un organe de traitement. Notre objectif est de trouver une solution à la *complexité du choix concernant les aspects matériaux et logiciel de ce dernier*. Cette complexité provient de nombreuses conditions dans le cahier de charge mais surtout des contraintes et des conditions d'élaboration de pièces dans le procédé de projection laser :

– les algorithmes de traitement d'images doivent être fiables en relation avec les conditions d'environnement :
    - Présence d'une très forte intensité lumineuse dans la zone d'interaction durant l'irradiation laser,
    - Présence de différentes perturbations d'appareils environnants (moteurs) et sources de bruit telles que des éjections de poudre, la fumée, la réflexion du faisceau laser et du système d'éclairage,
    - L'instrumentation de dépôt de poudre est encombrante au niveau de la zone d'interaction,
    - Mouvement de la pièce sous le faisceau laser s'effectue sur 3 ou 5 axes.
– la caméra doit répondre aux critères de résolution (liés à la taille du bain liquide et à la largeur du champ de vision), de dynamique, de fiabilité et de la connectivité de l'installation.
– Bien choisir l'équipement de vision avec des performances qui respectent le temps de cycles et la réactivité demandée du système de commande (temps de réponse).

II.6.2 Détermination du matériel de vision pour le contrôle/commande de procédé de projection laser

II.6.2.1 Choix de technologie : CCD ou CMOS ?

L'industrie de l'imagerie utilise principalement deux technologies pour fabriquer des capteurs d'images : la technologie CCD (plus ancienne) et la technologie CMOS.

- *La technologie CCD* (« Charge Coupled Device ») a été inventée en 1969. Elle consiste en une matrice de photo-sites ou pixels qui convertissent la lumière en charges électriques. Cette conversion nécessite un certain temps, réglable électroniquement, qui correspond au temps de l'obturateur électronique ou « electronic shutter ». Ensuite les charges sont transférées d'un coup vers une zone de stockage d'où elles sont dépilées et converties séquentiellement en niveaux de tension. Chacun d'eux est proportionnel à la luminance du pixel codé. Cette technologie a dominé le marché des capteurs pendant plus de trente ans et elle a la

[38] Ces informations contribuent à fiabiliser le procédé d'élaboration de la pièce. En plus de réduire les coûts de l'installation, on peut imaginer dans le futur réduire les coûts d'inspection en ayant un suivi en temps réel de la sante matière de la pièce.

particularité d'offrir des performances optiques et électriques très intéressantes, notamment leur qualité d'image et leur bruit relativement faible. Ces qualités sont le fruit d'une technologie mûre qui a été modifiée et dédiée pour cet usage unique, mais de ce fait coûteuse.

- *Les capteurs CMOS* (Complementary Metal Oxide Semiconductor) utilisent une technologie largement éprouvée dans le domaine de l'électronique numérique pour intégrer, sur le même substrat de silicium, la fonction capteur et la fonction de mise en forme du signal. La fonction capteur utilise les mêmes principes qu'en technologie CCD. C'est au niveau du conditionnement du signal que réside la principale différence.

Dans le procédé de projection laser, la source de lumière n'est pas le laser lui-même mais la zone de travail appelée zone de fusion (bain liquide). Elle produit une source lumineuse très puissante avec des températures de plus de 1800°C (en fonction du matériau), induite par un faisceau laser continu ou pulsé. Dans ces applications, le défi du traitement d'images est de rendre visible les informations caractéristiques dans les zones très brillantes de la scène : la zone de fusion. Les caméras CCD ne conviennent pas, car leurs *dynamiques sont trop faibles* : si des parties sombres ou claires de la scène sont visibles, les deux ne peuvent jamais être en même temps, ce qui est exactement le cas dans notre procédé. De plus les caméras CCD sont, de par la sérialisation de leurs données, plus sensibles aux effets de *blooming* (éblouissement) et de *smearing* (traînées verticales) provoquées par les régions très lumineuses de la scène. Les images suivantes illustrent le comportement des deux capteurs (CCD et CMOS) lors de phases de surexposition.

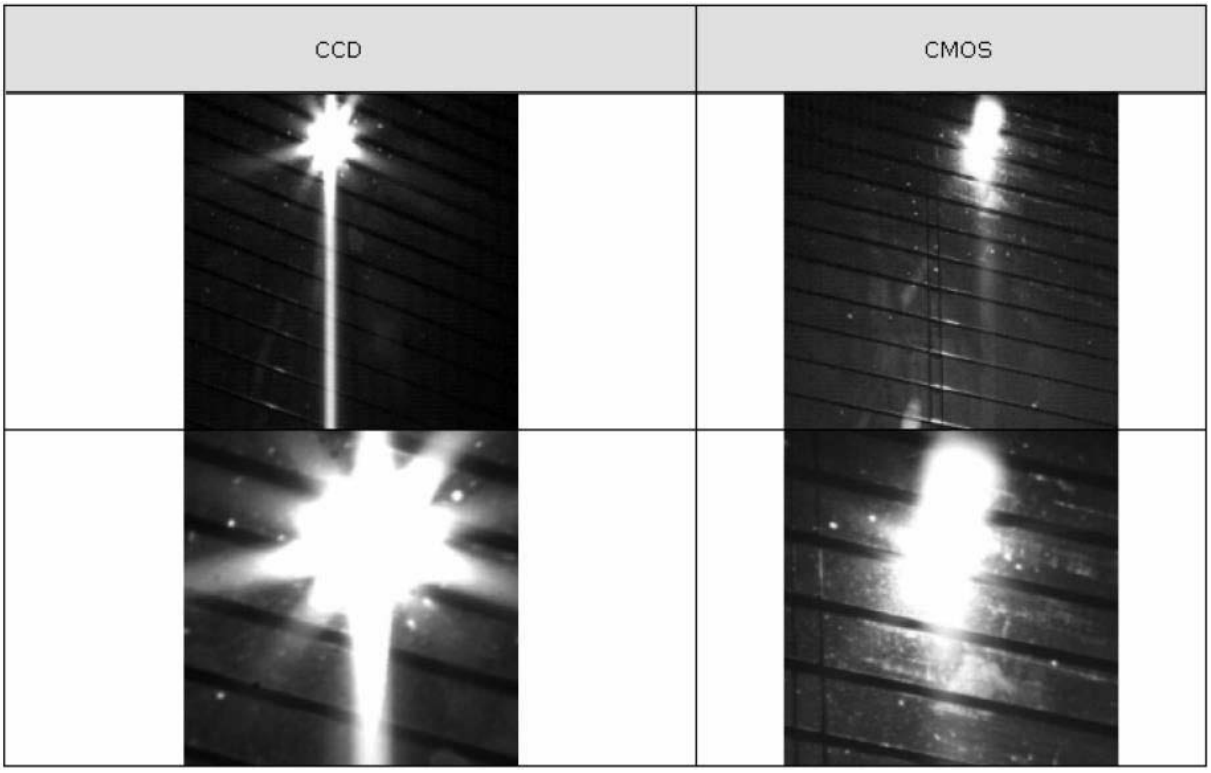


Figure II.27 – Le phénomène du blooming et smearing (Source : Elvitec)

Nous pouvons facilement observer les traînées verticales présentes sur le CCD, absentes sur le CMOS. Le phénomène de blooming est également identifiable sur la dernière photo de la caméra CCD, et pas sur celle de la CMOS. Enfin, le procédé de projection laser, requiert des *acquisitions d'images rapides* pour certaines applications comme, la visualision des mouvements hydrodynamiques des zones fondues (sens et vitesse des mouvements fluides) [6], là où les caméras CCD s'avèrent trop lentes.

C'est la raison pour laquelle les caméras à base de capteur CMOS ont été choisies pour notre application. En effet, comme on vient de le voir, les caméras CMOS possèdent plusieurs avantages par rapport aux caméras CCD vis-à-vis du traitement d'images et à notre problématique évoquée plus haut. L'un des plus remarquables est qu'en technologie CMOS, un pixel contient, non seulement une zone sensible, mais également un circuit d'amplification. L'accès à un pixel se fait à la manière d'une mémoire, c'est-à-dire par un système d'adressage : on peut ainsi accéder directement au niveau de tension d'un pixel, sans avoir à dépiler les pixels précédents comme pour un CCD. Ceci permet la sélection d'une partie de l'image (*ROI :Region Of Interest*) en permettant *d'augmenter les cadences d'acquisition* jusqu'à 100.000 images par seconde. L'autre avantage majeur des capteurs CMOS est sa très *grande dynamique* d'image (ou contraste) pouvant atteindre 120 dB (ou 20 bits). De plus, les capteurs CMOS offrent la capacité de mélanger au sein du même circuit des fonctions de nature différente (*capteur d'image et traitement du signal*). Ceci ouvre la voie à la possibilité d'intégrer des traitements plus ou moins avancés soit au niveau de chaque pixel soit après la chaine de conversion analogique/numérique.

Bernhard [60] a effectué une *étude comparative entre la caméra CCD et la caméra CMOS dans le contrôle en ligne de la soudure laser*. Le résultat de cette étude est montré dans la Figure II.28. A l'inverse de la caméra CCD, la caméra CMOS permet d'avoir plus d'informations du front arrière et le front de solidification du bain liquide.

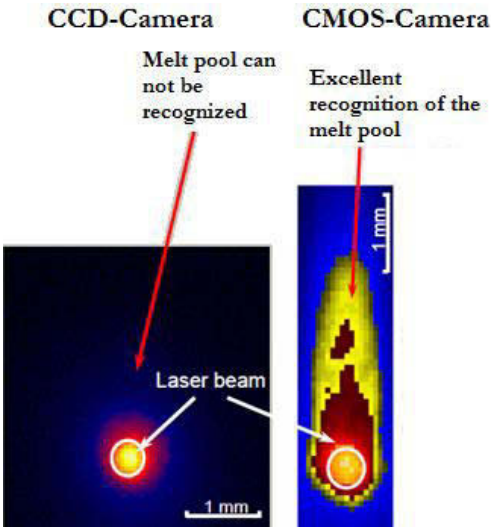


Figure II.28 – Comparatif entre caméra CCD et CMOS appliqué dans le contrôle en ligne de la soudure laser [60]

II.6.2.2 Sélection des caméras

Dans le cadre de notre application, nous avons rédigé *un cahier des charges de nos besoins*, que nous avons transmis à plusieurs fournisseurs spécialisés en vision industrielle. Trois fournisseurs ont répondu à notre demande (Alliance Vision, ELVITEC et Photonlines) et qui ont accepté de faire des démonstrations clients de leurs caméras. Nous avons testé ces caméras, allant des caméras utilisées en laboratoire, aux caméras de démonstrations. Les conditions d'acquisition restent quasi identiques, quelle que soit la caméra : Il s'agit de faire des films du bain liquide en vision coaxiale et latérale sur des géométries simples (Figure II.29).

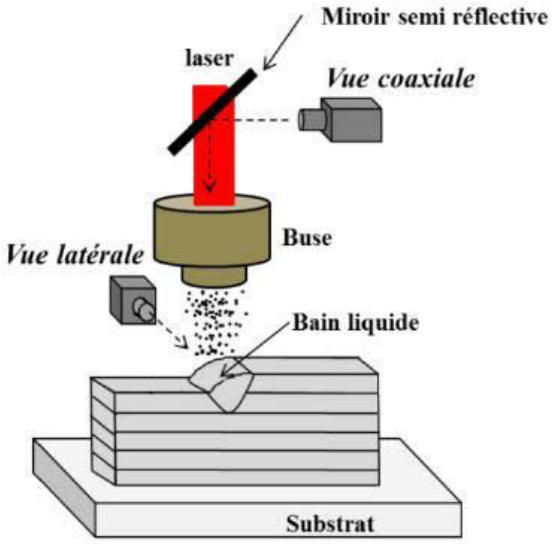


Figure II.29 – Positionnement des caméras pour la vision du bain liquide

Les images ont été sauvegardées sans compression, au format constructeur. Un tableau comparatif des caméras testées est présenté ci-dessous.

Fournisseur	Type de caméra	Coût	Logiciel d'acquisition et enregistrement
PIMM	***Pixelink PL-A741***- CMOS- FireWire- 33 fps at 1k x 1k, 105 fps at 640 x 480	/	PixeLINK Capture OEM
ELVITEC	***Baumer HXC20*** – CMOS- 2048 x 1088 pixel with up to 337 full frames per second	1693 HT (au 23/11/2011)	StreamPix 5
Photonlines	***Pco.1300 oem*** – CMOS – FireWire - 1392*1040	N'a envoyé aucun devis	Camware
Alliance Vision	**PHOTON FOCUS MV1-D1312-160-CL-12** CMOS - CameraLink	1980 HT (au 05/12/11)	DyVA-s Recorder & Player
	Sony XCD-SX90CR - Caméra couleur - IEEE 1394b	930,75 (au 23/01/2012)	
	PHOTON FOCUS MV1-D1312-100-G2-12 - CMOS - Gigabit Ethernet	2216 HT (au 26/07/2012)	

Tableau II.2 – Les caméras de tests

Les premiers essais se sont avérés non concluants. La plupart des caméras testées ne permettent pas en vision coaxiale de visualiser *le front arrière du bain*, ça *saturerait* très souvent en plus de présence *d'artefact* dû au jet de poudre en vision latérale. Concernant *le débit de transfert* entre la caméra et le PC, les caméras à base d'interface *CameraLink*[39] donnaient *de meilleures performances* et représentent l'une des meilleures solutions pour le transfert et le traitement d'images de plusieurs caméras en temps réel, car au contraire des caméras à base d'interface FIREWIRE ou Gigabit Ethernet, ils sont non déterministes : le temps entre l'instant où l'image est prise et celui où elle arrive au PC dépend de plusieurs facteurs comme la disponibilité de la bande passante et la charge du bus de communication.

[39] Cette interface est « point à point ». Elle est donc déterministe : le temps entre la capture d'image et l'arrivée à la carte d'acquisition est connu, prédictif et constant.

Dans le cadre de notre travail, concernant la mise en œuvre d'un système de vison pour le calcul des dimensions du bain qui sera détaillée dans la parte suivante, le choix de la caméra s'est porté sur un matériel pas cher mais donnant des meilleurs résultats aux niveaux qualité d'image et performance. Pour cela, le choix s'est porté sur l'utilisation des caméras *CMOS MV1-D1312-160-CL-12 de PhotonFocus avec interface CameraLink*, permettant la récupération d'images en temps réel et dans le domaine du visible au proche infrarouge (Figure II.30). Dans la Figure II.31, est représentée la caméra utilisée au cours de mon travail de thèse et ses principales caractéristiques. La caméra est fournie avec le module NI Vision Development et un logiciel de d'acquisition d'image nommé DyVA-s Recorder. La caméra peut être synchronisée par une horloge externe et elle permet d'intégrer sur le capteur des fonctions avancées telles que des pré-traitements basiques (Niveau de gris et table de correspondance (LUT), filtrages, détection de motifs,…..).

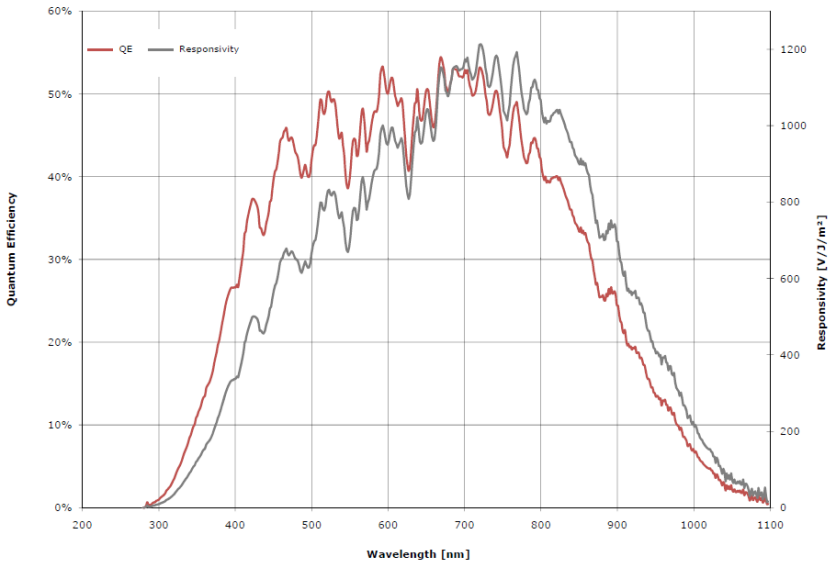


Figure II.30 – Courbe de réponse spectrale de la caméra MV1-D1312-160-CL-12

Capteur : Photonfocus A1312 (3eme Génération) Technologie : CMOS 1'' monochrome Résolution : 1312 x 1082 Taille pixel : 8µm x 8µm Numérisation : 8 -10-12 bits Fréquence image : 472fps @ 640 x 480 Flux max : 80MHz Dynamique : 120 dB via la technologie LinLog Sensibilité : $210x10^3$ DN/(nJ/cm²) à 650 nm/8bits/gain=1 Fill factor : > 60% Efficacité quantique : >50% Format de sortie : Base Camera Link Monture : C Dimensions : 60 mm (P) x 60 mm (H) x 45 mm (L) Poids : 260 g Alimentation : 12 VDC Consommation : <3 W Température de fonctionnement : 0 à 50°C	

Figure II.31 – Spécification de la caméra MV1-D1312-160-CL-12

Un point important de cette caméra est qu'elle utilise la technologie *LINLOG*[40] qui permet une adaptation de la courbe de réponse des pixels aux conditions d'éclairage. Chaque point d'image peut être programmé de manière purement logarithmique ou de manière purement linéaire ou en utilisant la courbe de réponse LINLOG qui combine ces deux méthodes. Ainsi, la réponse du capteur est *linéaire* à des niveaux de faible éclairage et logarithmique à des intensités élevées. L'intensité transitoire de la réponse linéaire à la réponse *logarithmique* peut être modifiée d'une image à l'autre. D'ordinaire, il suffit toutefois d'effectuer les réglages une fois par application. La transition entre les deux réponses est continue, et continuellement différentiable, de sorte qu'aucune singularité ne peut se produire durant le traitement d'images [61]. Le principe de la technologie LINLOG apparaît clairement sur la Figure II.32.

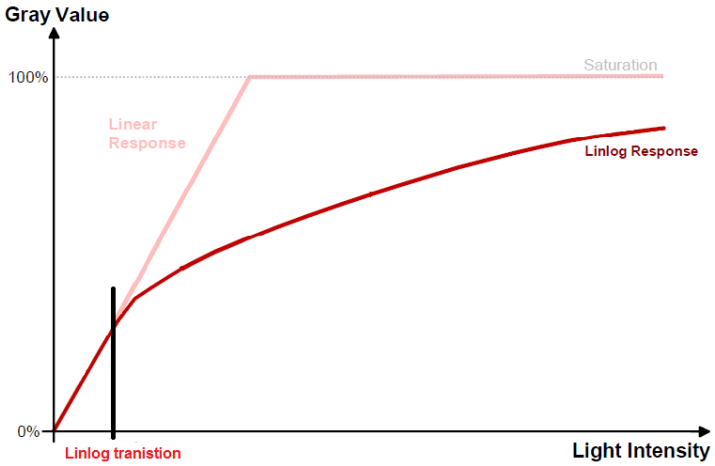


Figure II.32 – Principe de la technologie LINLOG [61]

Cette technologie prévient la saturation de l'image, même en cas de contraste extrêmement important. La figure ci-dessous donne un exemple d'une lampe 100W pris avec une caméra intégrant la technologie LINLOG.

Figure II.33 – Exemple d'une image capturé avec et sans la technologie LINLOG (Source : photonfocus.com)

Des images typiques de bain liquide prises par les caméras PhotonFocus (caméra coaxiale et latérale) sont illustrées à la Figure II.34. *La fluctuation du bain liquide, la distinction de la zone fondue, la présence du flou dans les bords du bain, et éventuellement la présence de vapeur, des reflets et d'éjections de poudre, sont autant de facteurs associés aux problèmes d'acquisition d'images du bain liquide et dont il faudra également tenir compte lors du traitement effectué sur ces images*.

[40] La technologie LINLOG a été développée au Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) pour surmonter les inconvénients des images à contraste élevé. PhotonFocus détient actuellement tous les droits de propriété intellectuelle de cette technologie (Source : Photonfocus.com).

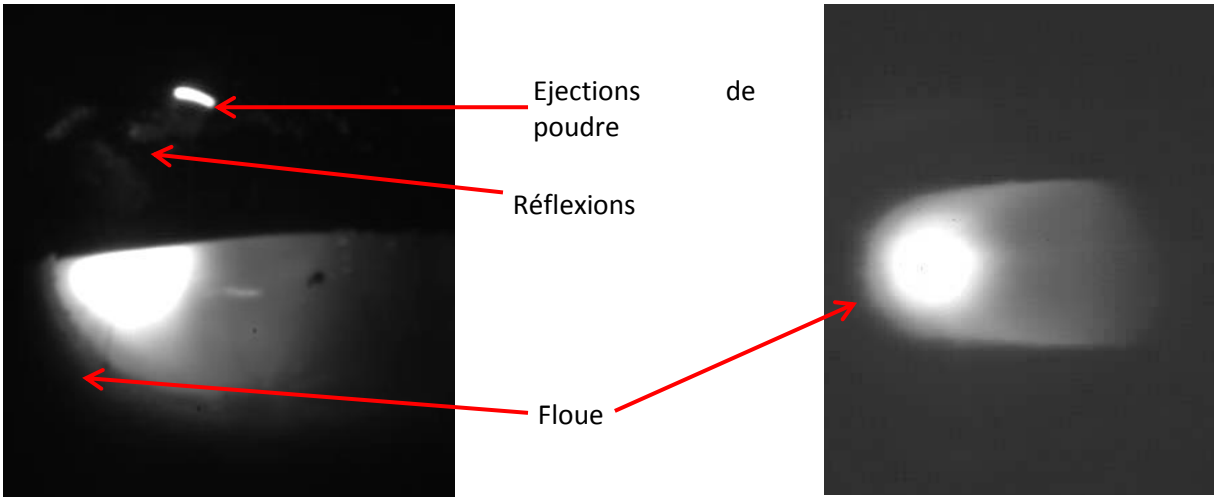


Figure II.34 – Images du bain liquide : (a) vue latérale, (b) vue coaxiale

L'étude de ces images a permis de mettre en évidence de nombreux problèmes et de dégager des orientations futures sur les algorithmes de traitements d'images à utiliser.

II.6.3 Mesure 2D du bain liquide

II.6.3.1 Le montage

La Figure II.35 donne un schéma du montage expérimental utilisé pour visualiser le bain liquide durant sa formation en coaxial (vue du bain par-dessus).

Dans ce montage, la lumière provenant de la zone de fusion passe vers le haut à travers la lentille de focalisation du laser. Ensuite, elle est déviée par un miroir dichroïque qui laisse passer la longueur d'onde du ND:YAG (1064nm) et qui réfléchit le visible vers le système optique de la caméra coaxiale, constitué par un miroir de renvoi, un diaphragme, une lentille de collimation de mise au point et d'un filtre passe-bas éliminant la longueur d'onde du rayonnement laser.

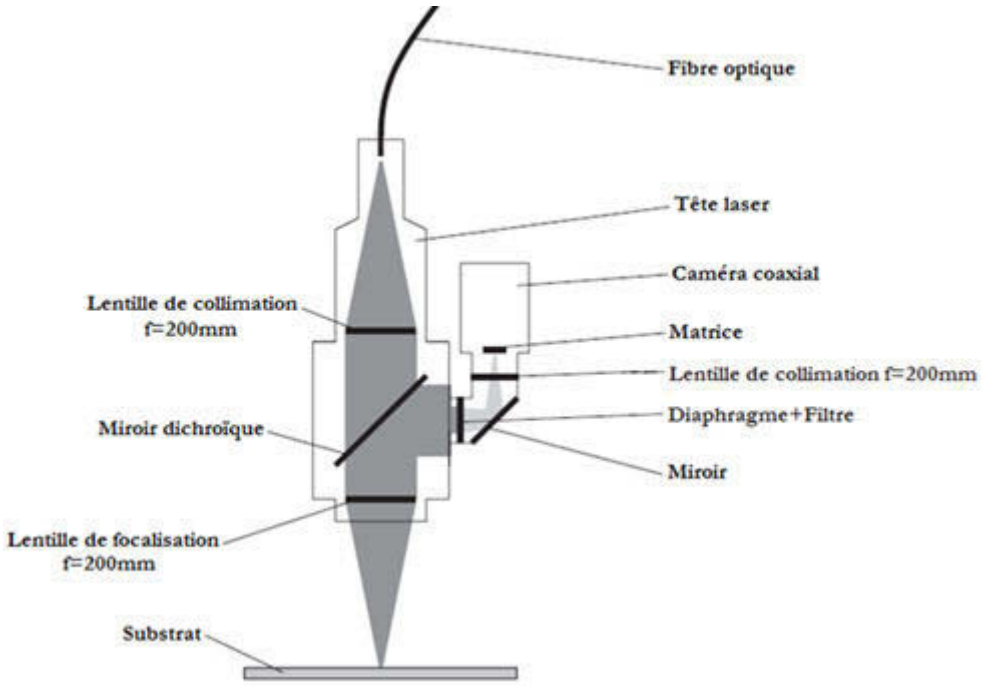


Figure II.35 – Schéma simplifié du montage expérimental

La forte intensité lumineuse du bain liquide impose de travailler à faible ouverture (diaphragme fermé). *La profondeur de champ*, proportionnelle au carré du nombre d'ouverture de travail[41], est alors réduite autour du plan de référence de façon à obtenir des images du bain nettes quelle que soit leur position dans le volume d'étude. Il s'agit donc d'adopter un montage mécanique qui permette de réaliser la mise au point sur le plan de référence. La caméra coaxiale est équipée par une bague de réglage à double hélice permettant de déplacer la lentille de collimation en haut et en bas (afin de le rapprocher ou l'éloigner du capteur) jusqu'à avoir une *image nette* sur la caméra.

Pour *optimiser le taux de transfert et réduire le temps de traitement*, une procédure de prétraitement est effectuée à l'intérieur de la carte d'acquisition. Il s'agit de réduire la taille de l'image et la limiter à la région d'intérêt (ROI : Region Of Interest) du bain liquide. Pour cela, on prend une image d'un pulse du laser et on calcule son centre de gravité (Xlaser,Ylaser) en pixels. La ROI est un carré de centre de symétrie est la ligne centrale du faisceau laser (Xlaser,Ylaser) (Figure II.36).

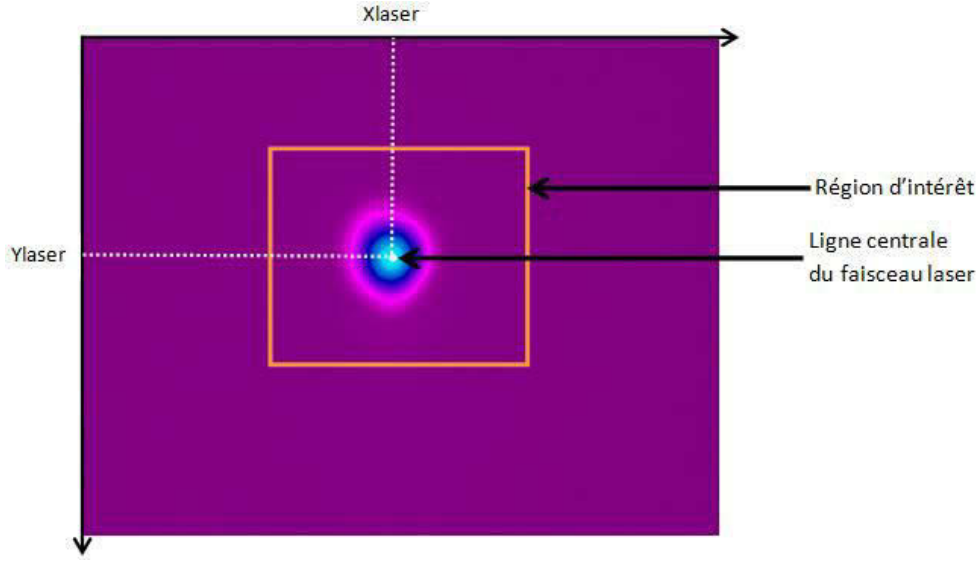


Figure II.36 – Calcul de la région d'intérêt

Avant de mettre en place le système de mesure, il faut *préciser le nombre de pixels à contrôler en longueur, largeur et en hauteur (écart en Z) des points d'observation*. En se basant sur les résultats de [6] et [5], l'ordre de grandeurs des dimensions du bain à mesurer (largeur ou hauteur) étant de l'ordre du millimètre (selon les paramètres utilisé dans la construction). L'écart en z a été estimé lors de la construction d'un mur (P400V400Dm2) composé de 30 couches. L'écart total par rapport à la hauteur attendue étant de 1.7mm, on simplifie par une erreur moyenne de 57um par couche créée [6]. Une caméra avec une définition de 300x300 pixels peut respecter largement ces contraintes car la limite de résolution dans le cas d'une mesure du bain de 2mm est de 2mm/300=0.007mm (7µm). Dans nos expériences la ROI est fixée à 400x400 pixels (0.16 mégapixels) correspondant à une résolution de 0.005mm (5µm).

Pour effectuer *la conversion des mesures du bain de pixels en millimètre*, un objet de référence (une mire ou un réglet par exemple) est placé sous les caméras, où une image est capturée avec le même grossissement utilisé pour visualiser le bain liquide. De cette image, le grossissement peut être obtenu à partir du rapport des dimensions de l'objet de référence, en millimètres, et des dimensions de l'objet dans l'image en unités de pixels[42].

[41] Le nombre d'ouverture, est le rapport entre la distance focale de l'objectif et le diamètre de sa pupille.
[42] Ceci est particulièrement vrai si on se place dans des conditions de projection parallèle. Ceci a été vérifié par la procédure de calibration expliqué un peu plus loin dans ce chapitre (Cf. II.6.5.2.1).

II.6.3.2 Les traitements d'images développées

Les traitements d'images développés au cours de cette étude sont de plusieurs ordres. Elles ont pour but d'extraire les caractéristiques géométriques du bain liquide qui seront ensuite utilisées dans l'étude du procédé en boucle ouverte (identification des modèles) et dans la boucle pour le contrôle/commande du procédé de projection laser (Figure II.37).

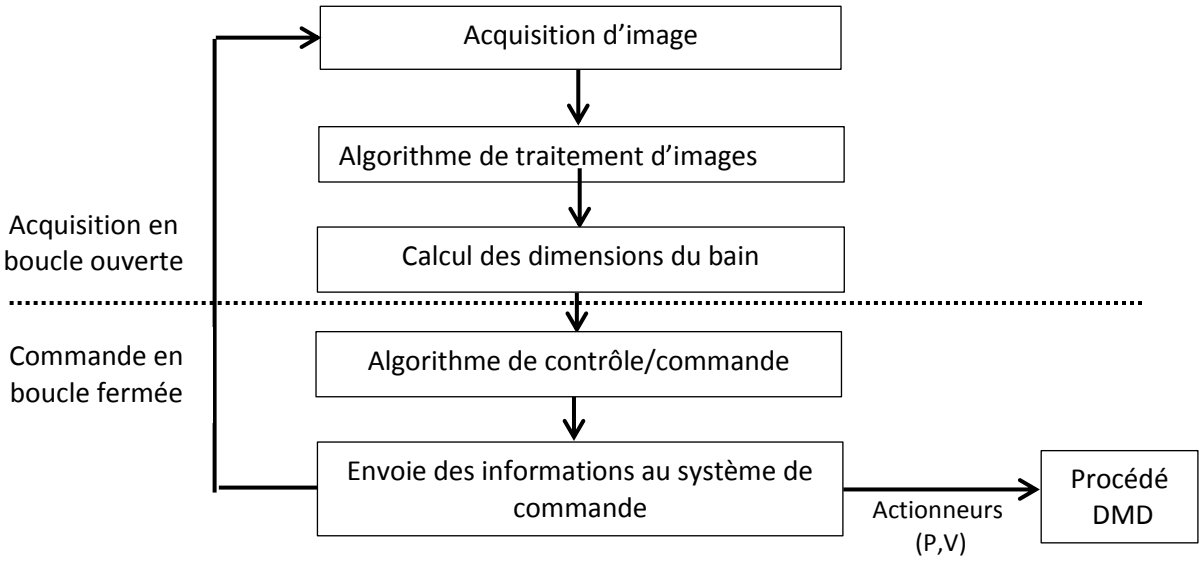


Figure II.37 – Organigramme représentant les étapes et des algorithmes de traitement d'images

Pour l'étude du procédé en boucle ouverte, les images sont traitées en *différé*. Les vidéos du bain issues des caméras sont enregistrées sur disque dur. Pour chaque vidéo, un fichier log est enregistré contenant l'information temporelle (timecode) pour chaque image (le numéro d'image attendu dans le disque dur, le numéro de l'image enregistré, la date et l'heure[43]).

En vue d'automatiser la procédure d'acquisition et du traitement d'images, nous avons développé au cours de cette thèse plusieurs programmes MATLAB. Dans cet objectif, la réalisation a été guidée par les fonctionnalités suivantes :

- Contrôler automatiquement le déroulement de l'acquisition des images et les signaux E/S. Pour cela, nous avons réalisé un circuit électronique qui a été ajouté à l'extérieur de la machine. Ce système détecte le déclenchement du tir laser et génère ainsi le démarrage de l'acquisition d'images et les signaux d'E/S[44]. La durée de l'enregistrement est la durée totale de fabrication.
- Présenter une interface graphique conviviale permettant d'analyser facilement les résultats. Ce programme recueille les images de la séquence vidéo, les données issues de la carte d'acquisition E/S et affiche les grandeurs de surfaces, comme la longueur, la largeur, la surface du bain, et la hauteur du bain. Ce programme peut être modifié à volonté pour s'adapter à un travail légèrement différent. La totalité des résultats est sauvegardé dans un fichier « .mat ».

Pour *le traitement d'images en temps réel pour le système de contrôle commande*. Les opérations sont les mêmes que celles définies pour le différé : Acquisition de l'image, prétraitement, segmentation et calcul des dimensions du bain. Ces opérations seront détaillées dans les

[43] Ce ficher est utilisé à vérifier qu'il n'y a pas eu de saut d'images, lors de l'acquisition, chose qui peut arriver lors d'étranglement des bus de communication ou saturation des disques durs

[44] Nous verrons par la suite que cette opération est très importante pour l'étape de modelisation et identification (Cf. Chapitre III)

paragraphes ci-dessous. Ne prétendant pas couvrir l'ensemble des applications du traitement d'images, cette partie se focalise sur les principes de base ainsi que sur les principales techniques mises en œuvre dans le cadre de notre procédé. Tout le développement s'est fait sur MATLAB avec les modules « Image Acquisition Toolbox» et « Image Processing Toolbox».

II.6.3.2.1 Prétraitement

Le prétraitement, regroupe toutes les techniques visant à améliorer la qualité d'une image. Ce prétraitement a pour but de *réduire les effets des dégradations (ou bruits) subies par une image*. Il est donc utile, dans un premier temps, de voir quelles peuvent être les sources de dégradation et les facteurs le plus gênant pour la vision du bain liquide. Il en existe plusieurs :

- Bruits lié au contexte de l'acquisition (bruits de mesures) et aux systèmes optiques (aberrations optiques, distorsions,….)
- Nature de la scène (très forte intensité lumineuse dans la zone d'interaction, la fumée, les reflets et les éjections de poudre)

Cet inventaire des sources de dégradation de l'image du bain a permis de mettre en évidence les solutions matérielles pour la *correction des aberrations optiques*[45] et les différentes étapes de traitement d'amélioration d'images :

II.6.3.2.1.1 Filtrage

On peut définir le filtrage numérique par une *convolution discrète* entre la fonction image I et une fonction de masque h :

$$G(x,y) = \frac{1}{D}\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} I(m,n)h(x-m,y-n) \qquad \text{(II.5)}$$

Où D est le coefficient de normalisation, $G(x,y)$ l'image filtrée, et (M,N) la taille de l'image

Ce type de filtre fait appel au principe de la convolution de l'image avec un *masque*. La définition de ce masque permet de caractériser le type de filtrage mis en œuvre. Dans la pratique, les masques de convolution sont des matrices carrées de dimension impaire. On centre ce masque sur chaque point de l'image I, puis on effectue le produit des points de recouvrement entre I et le masque. La nature du filtrage par produit de convolution dépend de la fonction de voisinage définie par le masque h sous forme d'une matrice de 3x3, 5x5,ou 7x7. En fonction de la définition des coefficients de matrice, le filtrage réalisé est de type passe-bas ou passe-haut [62].

Lors des traitements, si l'on veut conserver *l'information du contour*, il est nécessaire de préserver les hautes fréquences. Ceci ne peut se faire qu'au détriment de l'amélioration du rapport signal sur bruit (S/B). Ces deux aspects de traitement étant antagonistes, il est nécessaire de trouver un compromis. Ainsi, les opérateurs qui devront être utilisés doivent respecter deux critères incompatibles, amélioration du rapport S/B et conservation des contours [62].

Une solution communément répandue consiste à convoluer l'image avec un masque 3x3 [63]:

$$h = \left[\frac{1}{\delta+2}\right]^2 \begin{bmatrix} 1 & \delta & 1 \\ \delta & \delta^2 & \delta \\ 1 & \delta & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(II.6)}$$

[45] Les systèmes optiques (système de lentilles et les objectifs des caméras) utilisés dans notre application permettent une élimination d'un certain nombre d'aberrations ou tout du moins une atténuation de leur impact. Ainsi, les aberrations chromatique et sphérique sont corrigées par l'utilisation d'un doublet achromatique (ou l'achromat). Concernant les distorsions, il convient d'indiquer qu'elles peuvent être négligées et aucun traitement a posteriori n'est nécessaire (projection parallèle : Cf. §II.6.5.2.1).

Le coefficient δ contrôle la réponse du filtre, une valeur de 1 équivaut à un filtre de la moyenne (valeur moyenne des échantillons dans la fenêtre), tandis qu'une valeur élevée diminue l'effet du filtrage [63]. Le premier terme garantit une réponse normalisée, c'est-à-dire sans effet de gain. L'horizon du noyau de convolution peut être étendu (7x7 et plus) pour accroître l'effet de lissage. De façon générale, le filtre gaussien ou de moyenne pondérée ou, mieux, le filtre non linéaire de la médiane donne des résultats plus satisfaisants que le filtre de la moyenne pour réduire le bruit d'une image.

Dans le cadre de notre application, différentes possibilités ont été étudiées dans le but de réduire les perturbations dues à la luminosité, le jet de poudre et surtout pour garantir la robustesse des algorithmes de détection de contours et d'extraction des caractéristiques géométriques du bain. Le filtre gaussien a été retenu pour notre application. *Ce choix a été motivé par le bon compromis entre l'amélioration de l'image et le temps d'exécution*. L'utilisation de ce filtre a permis de réduire les fluctuations des niveaux de gris et ainsi d'obtenir des régions plus homogènes pour l'étape de segmentation

Sur les images du bain les niveaux de gris sont regroupés dans un intervalle étroit qu'il faut redistribuer afin de leur faire occuper toute la bande de nuances possibles. Pour ce faire nous avons choisi de *recadrer la dynamique* en décidant d'un certain pourcentage de pixels recadrés. Soit 2% entre 0 et le Min, 3% entre Max et 255. On recadre ainsi 95% de l'histogramme et les 5% restant sont forcés pour moitié à 0 et pour moitié à 255 (Figure II.38).

Figure II.38 – Modification d'histogramme

II.6.3.2.2 Segmentation

Une fois l'image prétraitée vient la phase la plus importante et la plus difficile : la segmentation. Segmenter une image correspond à effectuer une *partition de l'image en plusieurs régions homogènes*. Cette étape doit permettre d'extraire, de manière aussi exacte que possible, les "objets" présents dans cette image.

La segmentation d'images est réalisée en deux étapes :

- *Seuillage* ou binarisation : qui va transformer notre image en image binaire. Les performances de l'étape suivante dépendent fortement des résultats de l'algorithme de binarisation utilisé, c'est pour cette raison que l'étape de binarisation doit être effectuée le plus fidèlement possible.
- *Extraction de contour* du bain liquide donnant les coordonnées (x,y) en pixels du périmètre du bain. Ces coordonnées peuvent ensuite être utilisées dans le repère du monde (en mm) pour faire des mesures topologiques.

II.6.3.2.2.1 Seuillage

La technique de segmentation la plus simple procède par binarisation, où les pixels de l'image sont partagés par un seul seuil « *S* » en deux *classes* (ou régions) : ceux qui appartiennent au fond (ou arrière-plan) et ceux qui appartiennent à l'objet. C'est le processus de seuillage. L'extraction de l'objet revient donc à sélectionner la valeur du seuil « S » qui sépare les deux classes.

Dans le cas d'une procédure automatique, l'algorithme de seuillage doit être capable de déterminer quels pixels constitue l'objet ou le fond. De nombreux algorithmes ont été proposés dans la littérature [52]. Dans [64], les méthodes de seuillage ont été classées selon les informations qu'elles exploitent, en six catégories : 1. méthodes basées sur la forme de l'histogramme, 2. sur le clustering, 3. sur l'entropie, 4. sur les attributs d'objet, 5. méthodes spatiales, 6. et méthodes locales.

La première méthode (dite à seuillage global), est basée sur le calcul de l'histogramme de l'image, en exploitant les pics de ce dernier. La seconde technique utilise une analyse de cluster sur des images au niveau de gris partitionné en deux classes (fond et objet). La troisième technique est basée sur le calcul de l'entropie de l'objet et du fond après seuillage. Le seuil optimal est calculé en maximisant l'entropie de l'image. La quatrième technique consiste à rechercher des similitudes entre l'image initiale, et l'image binaire, en utilisant des critères tels que la coïncidence de contours. Le cinquième algorithme, le seuil dépend non seulement du pixel soi-même mais aussi de ses informations locales. Enfin, la sixième technique (dite à seuillage dynamique ou adaptatif), le seuil dépend à la fois de la position du pixel, de la valeur du niveau de gris et d'un attribut (par exemple, l'intensité médiane centrée sur le voisinage du point considéré).

Une image typique de bain liquide prise par la caméra coaxiale et latérale est illustrée à la Figure II.34. Comme on peut le voir, l'image peut paraitre simple, où le système visuel humain peut facilement distinguer le bain liquide de l'arrière-plan. *La présence du flou dans les bords du bain, et éventuellement la présence de vapeur, les reflets et les éjections de poudre rendent difficile le processus du seuillage*.

Dans le cadre des applications mises en place au cours de ces travaux, nous avons testé plusieurs méthodes de seuillage que nous venons de présenter. Ces méthodes ne donnent pas les mêmes résultats et certaines sont plus adaptées à la vision latérale plutôt qu'à la vision coaxiale. D'où la nécessité d'en disposer de plusieurs afin d'en extraire celle qui est la plus adaptée à l'image considérée. *Notons que les critères de choix des méthodes sont liés aussi à leurs facilités d'implantation et leur vitesse d'exécution*. Ces deux critères sont très importants dans la réalisation d'un système de commande en temps réel, où les parties matérielles et logiciels seront en fonction de la fiabilité et de la réactivité suivant l'application visée. Il a été difficile de tirer des règles, outre que les remarques déjà faites dans les paragraphes précédents. *L'adéquation d'une méthode à un type d'image reste un problème largement ouvert mais néanmoins quelques éléments de réponse ont été trouvés*.

II.6.3.2.2.1.1 Calcul du seuil pour la vision coaxiale

La méthode qui sera utilisée pour segmenter ces images est la *méthode du seuillage global*. Le principe est le suivant : Il s'agit de partitionner l'image $I(m,n)$ en deux régions suivant la règle:

$$B(m,n) = I(m,n) \geq S \qquad \text{(II.7)}$$

Où $B(m,n)$ est l'image binaire. Le problème de segmentation se limite alors au problème d'estimation du seuil S. Une approche très simple développée par [19] a suscité notre intérêt. Dans cette méthode, la valeur de seuil est déterminée comme suit :

On enregistre avec la caméra coaxiale, le bain liquide du dernier cordon d'un mur de vingt couches. Les cordons élaborés ont été tronçonnés à plusieurs endroits différents le long du mur et *examinés au microscope optique* à balayage. Sur les images obtenues au microscope (Figure II.39a), nous avons mesuré la largeur réelle du dernier cordon. La largeur du bain[46] est ensuite calculée pour toutes les valeurs du seuil (de 1 à 254) et comparée à la valeur de la largeur réel du cordon. La Figure II.39b donne le résultat de ces calculs dans le cas du TA6V avec P=400W, V=400mm/min et Dm=1g/min. *La*

[46] Le calcul de la largeur du bain sera discuté dans le § II.6.3.3.

valeur du seuil optimal est l'intersection entre la largeur du bain calculé par seuillage et la largeur réel du dernier cordon (dans notre cas 1.20mm).

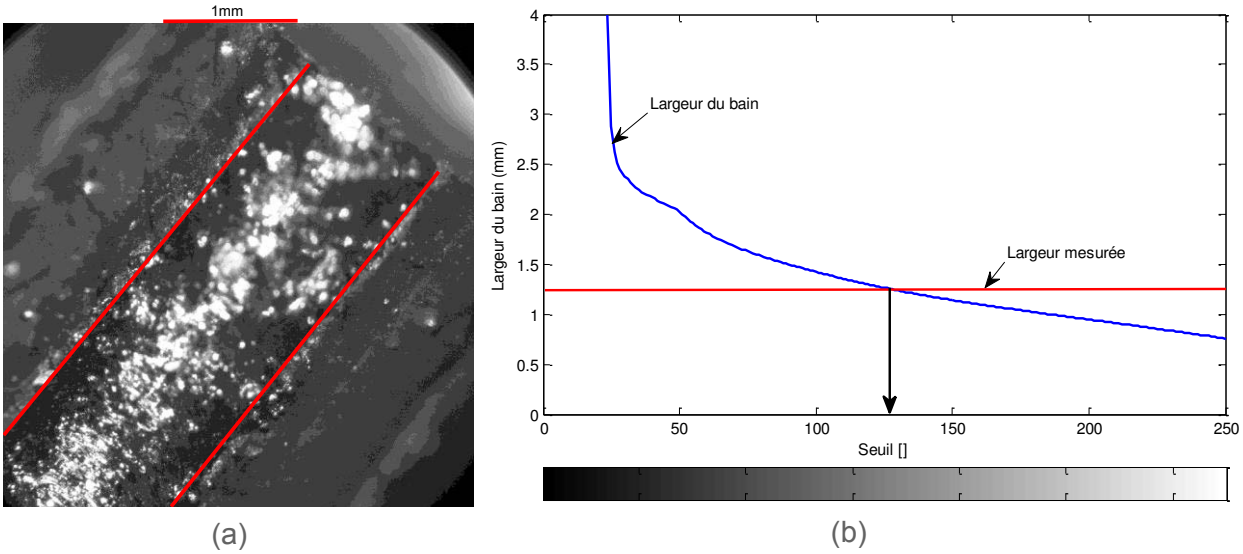


Figure II.39 – Calcul du seuil : (a) L'image d'un échantillon de cordon capturé à partir du microscope, (b). La largeur du bain en fonction du seuil

Comme les informations spatiales et les informations du voisinage des points ne sont pas prises en considération dans le calcul du seuil, cette approche possède un avantage sur la *stabilité* des résultats et la *rapidité* d'exécution. Pour les images latérales, les approches locales sont toujours appréciées. Elles donnent généralement de meilleurs résultats que l'approche globale mais au prix de la complexité.

Cette méthode peut être étendue à d'autres matériaux [19]. On peut utiliser d'autres techniques d'étalonnage comme *l'utilisation d'une caméra infrarouge pour faire correspondre la valeur du seuil à une plage de températures* (exemple : la température de fusion du matériau) [25]. L'image obtenue par la caméra (Figure II.40a et b) est traitée afin d'associer à des niveaux de gris différents des couleurs différentes (mode pseudo-couleur[47]) correspondant aux surfaces de certaines isothermes (à l'hypothèse de l'émissivité constante sur l'isotherme) (Figure II.40d). Rappelons que dans le cas d'un alliage, le changement de phase a lieu sur un intervalle de température correspondant aux températures de solidus et de liquidus. Il est alors possible en recalant cette image (par une transformation de coordonnées) avec l'image obtenue par la caméra infrarouge (Figure II.40c), d'associer une de ces deux températures (isothermes) à la valeur du seuil (niveau de gris) observé sur les images [33]

[47] Les zones sombres sont visualisées par des couleurs chaudes (rouge, jaune), les zones claires par des couleurs froides (vert, bleu). Des zones de teinte de gris proches sont ainsi mieux différenciées.

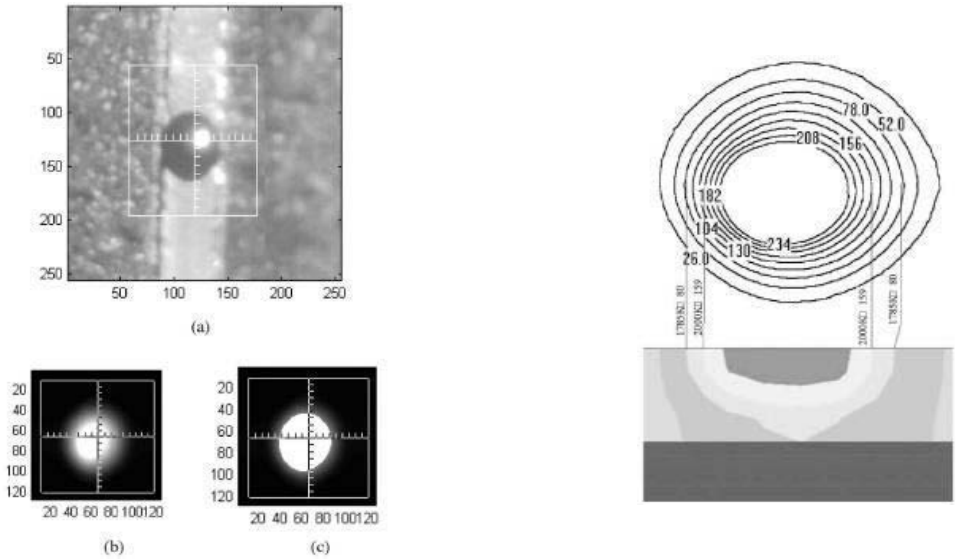


Figure II.40 – Détermination du seuil par caméra infrarouge [33]

II.6.3.2.2.1.2 Calcul du seuil pour la vision latérale

La méthode qui sera utilisée pour segmenter les images de la caméra latérale est la méthode de seuillage adaptatif. Cette solution est basée principalement sur les travaux de [29] [65] et [66]. Dans ces travaux, *un seuillage de type adaptatif a permis de binariser l'image du bain liquide, en prenant en compte les différentes conditions opératoires et la variation de lumière, tels que le jet de poudre, vaporisation et les réflexions*.

Dans ce qui suit, nous présentons une description courte de la méthode de seuillage adaptatif utilisant l'entropie floue. Un raisonnement en logique Floue, permet de trouver la valeur seuil qui minimise l'incertitude associée à l'image [67] [68]. Cette incertitude est déterminée par l'entropie floue présentée ci-dessus.

Le principe de la méthode consiste à faire varier le seuil de 1 à 254. Pour chaque valeur du seuil, on calcule l'entropie floue de la classe objet et celle de la classe du fond. Le seuil optimal est celui qui va minimiser l'entropie floue totale.

Notation :

- Soit *I* une image de taille *M x N*, représenté sur *L* niveau de gris. Soit *h(g)* son histogramme avec $0 \leq g \leq L-1$
- Pour un seuil 't' l'image *I* sera partagé en deux classes, le fond (μ_0) et l'objet (μ_1). La valeur moyenne de ces classes est :

$$\mu_o = \frac{\sum_{g=0}^{t} g h(g)}{\sum_{g=0}^{t} h(g)} \quad et \quad \mu_1 = \frac{\sum_{g=t+1}^{L-1} g h(g)}{\sum_{g=t+1}^{L-1} h(g)} \tag{II.8}$$

- Pour calculer les degrés d'appartenance des niveaux de gris à la classe fond ou à la classe objet, ces fonctions d'appartenance sont proposées (triangulaire et gaussienne) :

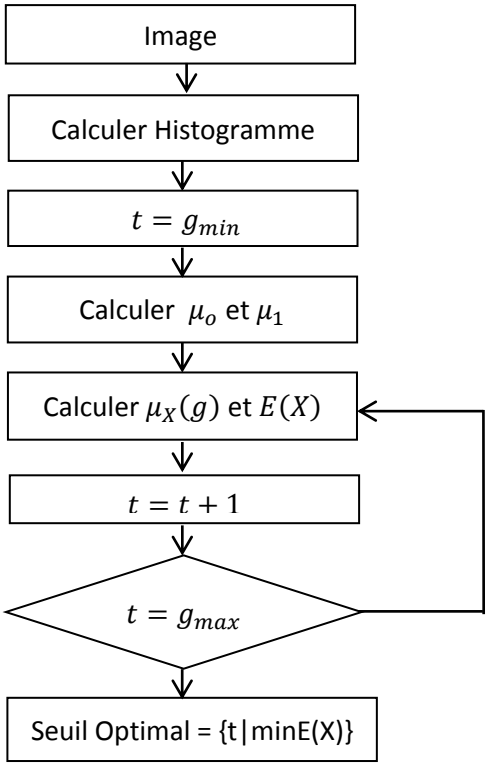
$$\mu_X(g) = \begin{cases} \dfrac{1}{1 + \dfrac{|g - \mu_o|}{C}} & Si\ g \leq t \\ \dfrac{1}{1 + \dfrac{|g - \mu_1|}{C}} & Si\ g \geq t \end{cases} \tag{II.9}$$

La constante *C* est choisie pour que $0.5 \leq \mu_x(g) \leq 1$. Cette fonction possède la particularité de ne pas avoir une grande variation de ses valeurs.

$$\mu_X(g) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-(g-\mu_o)^2}{2\sigma^2}\right) & Si\ g \leq t \\ \exp\left(\frac{-(g-\mu_1)^2}{2\sigma^2}\right) & Si\ g \geq t \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

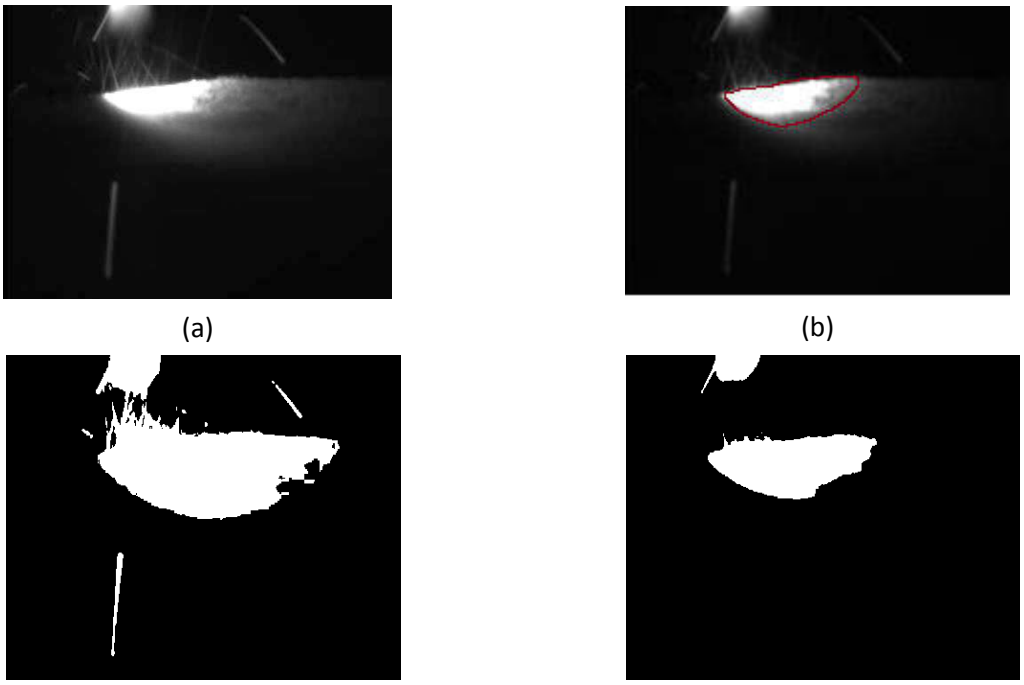
La valeur σ permet de régler l'échelle de la gaussienne et elle est fixée à α x L *avec* $0 < \alpha \leq 1$.

Algorithme



Résultats

La méthode proposée a été testée et validée sur un ensemble d'images du bain liquide dans différentes conditions. La figure suivante représente les résultats obtenus sur lesquels ont été appliqués un seuillage manuel, la méthode proposée dans ce travail, et les méthodes classiques de seuillage trouvées dans la littérature [64].



(a) (b)

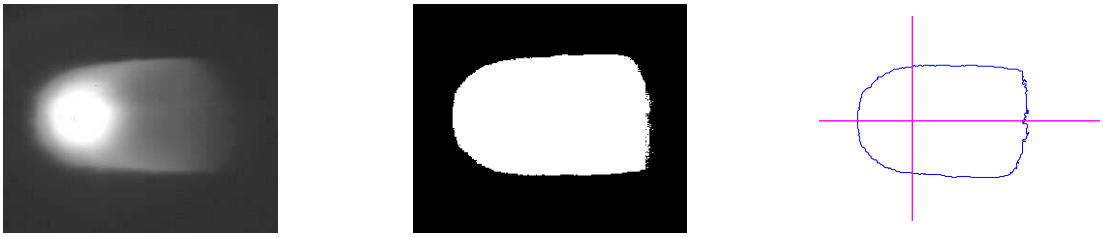
(c) (d)

Figure II.41 – Résultat de seuillage sur une image latérale : (a) Image Originale, (b) Seuillage manuel (c) Seuillage Otsu, (d) Seuillage adaptatif

On constate pour cette image que la binarisation par les méthodes traditionnelles comme la méthode d'Otsu donne des résultats médiocres et elle est incapable de séparer le jet de poudre du fond de l'image, par contre, le résultat par la méthode de seuillage adaptatif donne de meilleurs résultats et se rapproche du profil défini manuellement.

II.6.3.2.2.2 Détection de contours

Le résultat du seuillage est une image binaire avec le bain liquide en blanc et le fond en noir. *La détection de contours consiste à rechercher un ensemble de points délimitant ce bain liquide*. Ce contour peut être obtenu par des méthodes basées sur le voisinage direct des pixels constituant les régions homogènes [53]. Le principe de la méthode consiste à trouver le premier pixel p appartenant au contour du bain liquide. On peut définir autour de lui 8 directions possibles. On parcourt l'image en commençant du pixel p jusqu'au premier pixel appartenant au contour ensuite nous allons suivre le contour dans le sens horaire jusqu'à retrouver la coordonnée d'origine du contour c'est à dire le point p. Grâce aux coordonnées de départ du contour et de toutes les directions, il est possible de retracer le contour et calculer ces coordonnées en (x,y).
La Figure II.42 montre un exemple de détection de contour du bain liquide défini en Figure II.42A.



(a) (b) (c)

Figure II.42 – Résultat d'extraction du contour du bain: (a) Image originale, (b) Image binaire, (c) Contour du bain

Pour préparer au mieux le contour pour l'étape finale de calcul des dimensions du bain, on a utilisé un *lissage par le barycentre*. Cet opérateur nettoie l'image des résidus provenant d'une mauvaise délimitation de la classe correspondant au niveau logique 0 (le fond), de plus, son action permet de limiter les fluctuations des bords du bain liquide. Ainsi les points de coordonnées (x,y) sont remplacés par le barycentre calculé sur cinq points.

II.6.3.3 Extraction des caractéristiques géométriques du bain

En partant du résultat de détection de contour de l'image coaxiale du bain, nous allons pouvoir extraire les caractéristiques géométriques du bain liquide. Dans cette partie, nous allons présenter la méthodologie que nous avons utilisée.

II.6.3.3.1 Centre de Gravité

Pour le calculer, on va utiliser les coordonnées en x et y du contour du bain. On calcule la somme des coordonnées en x pour chaque point et on divise par le nombre total de points. Même opération pour les y. La coordonnée trouvée est le centre de gravité du bain liquide (Figure II. 43).

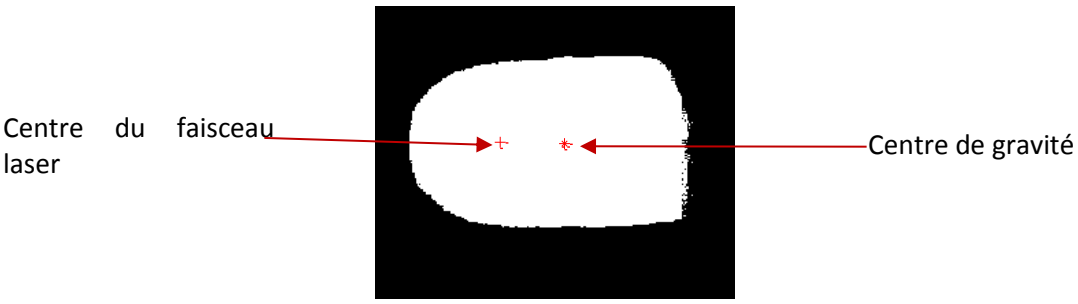


Figure II. 43 – Centre de gravité du bain liquide

II.6.3.3.2 L'orientation du bain

L'orientation du bain nous renseigne sur le sens de la trajectoire de la pièce. *Cette information peut être obtenue soit directement par la CN* quand cela est possible (mais ça n'était pas le cas dans notre système), soit par le calcul de l'angle θ, représentant l'angle de rotation de l'axe passant par le centre de gravité du bain liquide par rapport à l'axe traversant le centre du faisceau laser (Figure II.44).

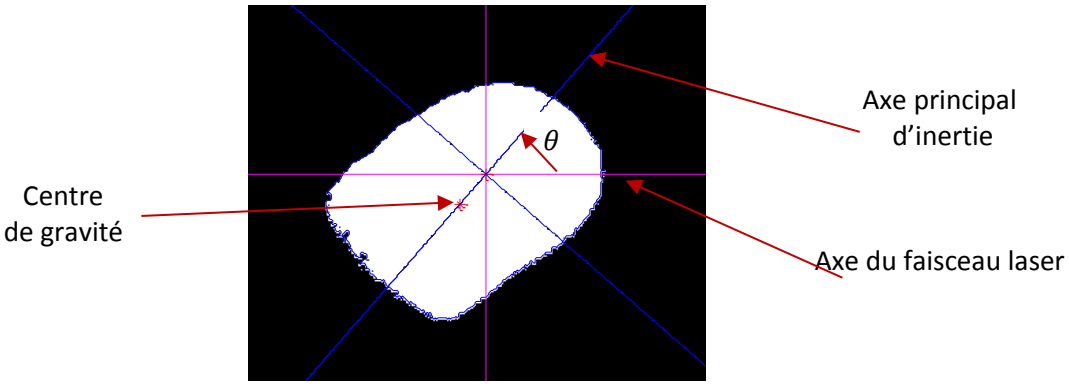


Figure II.44 – Orientation du bain liquide

La Figure II.45 représente un exemple de graphe généré par le calcul de l'angle. Les images ont été prises par la caméra coaxiale pour un déplacement en *aller/retour* de la buse en transversal avec un temps de pause aux extrémités.

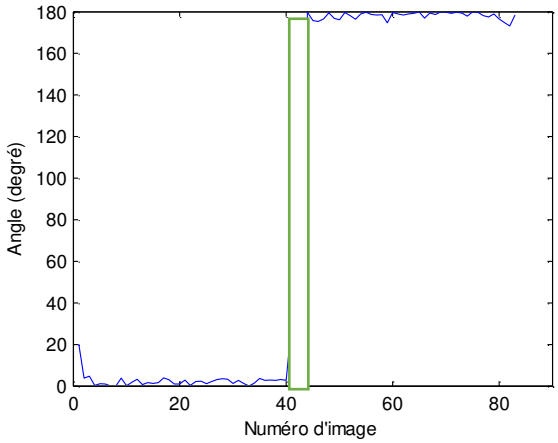


Figure II.45 – Calcul de l'angle sur un cordon (déplacement aller/retour linéaire)

II.6.3.3.3 Longueur et largeur du bain

A partir du contour du bain liquide, on calcule les dimensions du rectangle dans lequel est inscrite la surface du bain (*bounding box*)(Figure II.46). La longueur et la largeur du bain correspondent aux dimensions de la bounding box (longueur L1 et largeur L2).

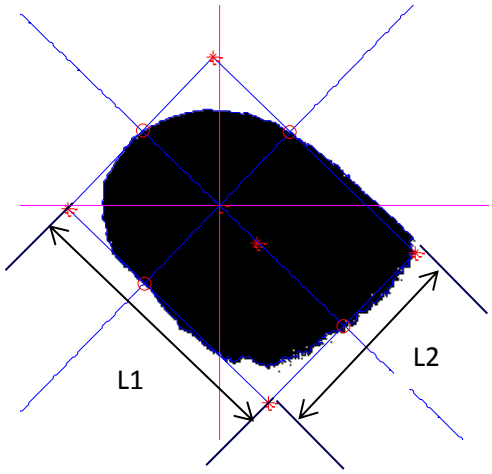


Figure II.46 – Calcul de la longueur et la largeur du bain

La figure suivante, montre le résultat de calcul de la largeur du bain pour une variation de puissance sous forme *sinusoïdale*.

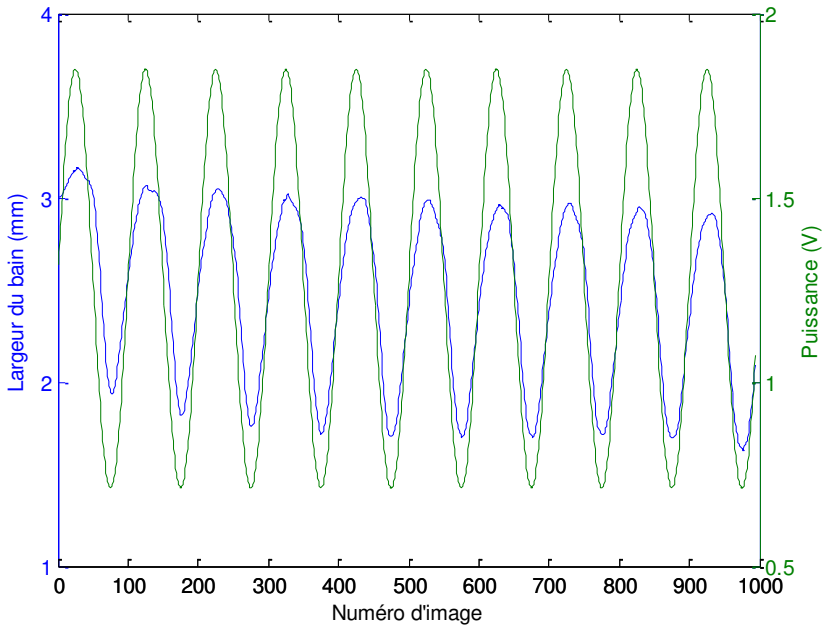


Figure II.47 – Mesure de la largeur du bain (Puissance oscillante à vitesse constante)

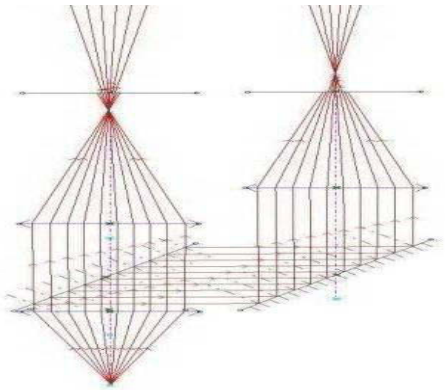
II.6.4 Mesure de la position en Z du bain liquide par dispositifs coaxiaux

II.6.4.1 Les différents dispositifs coaxiaux

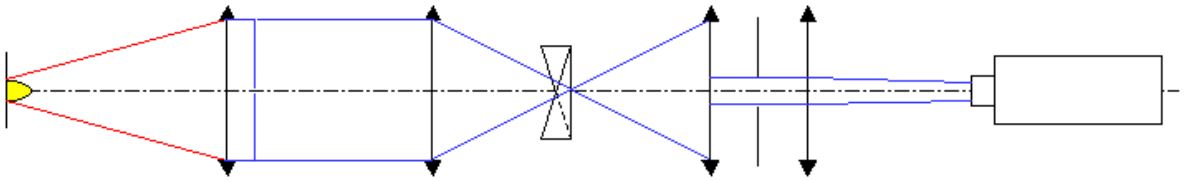
Le moyen de mesure en Z qui répond le mieux aux contraintes d'encombrement du procédé de projection laser est certainement un dispositif coaxial (une vision perpendiculaire au bain de fusion). Il est alors possible d'utiliser le miroir dichroïque de la tête laser pour intercaler le montage entre les caméras et le miroir de renvoi. L'observation coaxiale au faisceau laser offre l'avantage de limiter l'encombrement du système autour de la buse, d'un positionnement simple du capteur et évite tout risque de détérioration par des projections de matières ou par l'intense dégagement de chaleur au niveau de la zone d'interaction.

Notre étude bibliographique a permis de déterminer les capteurs, dont la mise en œuvre n'est pas trop complexe dans une première approche, ainsi que les différents montages possibles. Dans le cadre de mon travail, nous avons retenu deux systèmes de vision coaxiale de type *défocalisation* et *stigmomètre*. De plus, ces systèmes étant habituellement utilisés dans le domaine de la photographie et de la microscopique [51], il est intéressant de tester leurs faisabilités pour des utilisations macroscopiques. Dans la (Figure II.48) sont représentés les deux montages que nous avons testés pour mesurer la montée en Z en temps réel.

(a)



(b)



(c)

Figure II.48 – Systèmes de mesure en Z : (a)- Montage expérimental (b)- Schéma de principe du montage par défocalisation (c)- Schéma de principe du montage stigmomètre[48]

Dans ces systèmes on utilise le miroir dichroïque de la tête laser qui laisse passer la longueur d'onde du laser Nd :YAG (1064nm) et qui réfléchit la lumière dans le visible. Le montage (défocalisation ou stigmomètre) doit être positionné entre les caméras et le miroir de renvoi, ce qui conduit à un système encombrant l'axe Z.

Le montage par défocalisation est constitué d'un *cube beam splitter* 50:50 qui permet le renvoi de l'image du bain sur deux chemins optiques. Le principe fonctionne par la comparaison entre deux images de cette projection du bain. L'enregistrement des images par deux caméras est fait à deux distances de part et d'autre de la focalisation du faisceau lumineux. Le réglage s'effectue par deux lentilles de focalisation montées chacune sur un tube ajustable. La différence entre les deux tailles de bains permet d'obtenir une valeur correspondant à la différence de surface entre les deux images l'une étant délocalisée (plus grande) et l'autre plus concentrée (plus petite).

Le montage stigmomètre est formé de deux demi-prismes accolés par la face triangulaire et mis en opposition. Le principe est donc d'utiliser la lentille de focalisation du laser comme focale du stigmomètre : un écart de distance au niveau des couches se traduirait par une ligne brisée au niveau de la périphérie de l'image du bain projetée sur la caméra.

II.6.4.2 Evaluation de dispositifs coaxiaux

Des études en simulation ont été réalisées sous le logiciel *ZeMAX et Optgeo* afin de déterminer le dimensionnement de la chaine optique[49] et la sensibilité de mesure de ces deux montages (stigmomètre et défocalisation). Ces études ont été complétées par des essais de construction de murs de 20 couches de paramètre P600V200D2 avec un ΔZ programmé variant de -400 à +400 µm par rapport à la position ΔZ0. Pour cela on utilise un doublet de lentilles achromatiques[50] de 400 mm de focale. On projette ainsi l'image sur le stigmomètre (ou defoc), et on récupère l'image en sortie par un autre doublet d'achromats, la seconde lentille ayant une distance focale de 200 mm. Une troisième caméra, perpendiculaire à la buse et transversale au mur construit, permet de valider les calculs de la montée en Z dans un repère fixe lié à la buse. Les vidéos sont acquises via l'interface Camera LINK. Sur ces vidéos nous appliquons des algorithmes de traitement d'images capables d'extraire la hauteur du cordon. La question est de choisir l'algorithme à appliquer. Pour répondre à cette question nous avons testé plusieurs algorithmes que l'on retrouve dans la littérature et qui peuvent être regroupés en en trois grandes familles : mesures différentielles, statistiques et fréquentielles.

[48]Document interne : Dispositif de mesure coaxiale de distance ; par : Pascal Aubry, Eric Bartnicki, Rémy Fabbro ; 02/12/2003 ; Réf. : CLFA/01-063/PA

[49]Constituant tous les éléments optiques qui vont du bain liquide jusqu'à l'entrée du dispositif d'imagerie

[50]Ces doublets achromatiques sont constitués de deux lentilles collées ; la première, convergente, la deuxième, divergente. Cette configuration permet aux doublets d'achromats de s'affranchir des aberrations sphériques, des comas et, des aberrations chromatiques.

II.6.4.3 Conclusion partielle : choix d'un dispositif de mesure

L'utilisation des montages coaxiaux se réfère à une problématique sur la sensibilité et l'étendue de mesure [69]. *En effet, on s'est aperçu que ces montages ne sont pas assez sensibles pour mesurer de manière fiable des écarts de distance représentatifs, c'est-à-dire de l'ordre de 50 à 100 microns, ils permettent tout juste de mesurer un décalage de focale de l'ordre du millimètre (ce qui est 10 fois au-dessus des attentes). De plus, un tel déplacement brouille l'image (le système optique n'offrant pas suffisamment de profondeur de champ). Ces conclusions viennent confirmer les résultats des travaux préliminaires effectués au laboratoire* [70]. *On peut donc en conclure qu'une telle configuration ne peut donner des résultats satisfaisants pour notre application et nous avons malheureusement été contraints d'abandonner ce type de capteur, et on s'est orienté vers une autre voix : la mesure 3D hors axe.*

II.6.5 Développement d'un dispositif hors axe de mesure en Z

II.6.5.1 Le montage

La Figure II.49 et Figure II.50 donne un schéma de la solution matérielle retenue pour visualiser simultanément le bain liquide durant sa formation en coaxial (vue du bain par-dessus) et en latéral.

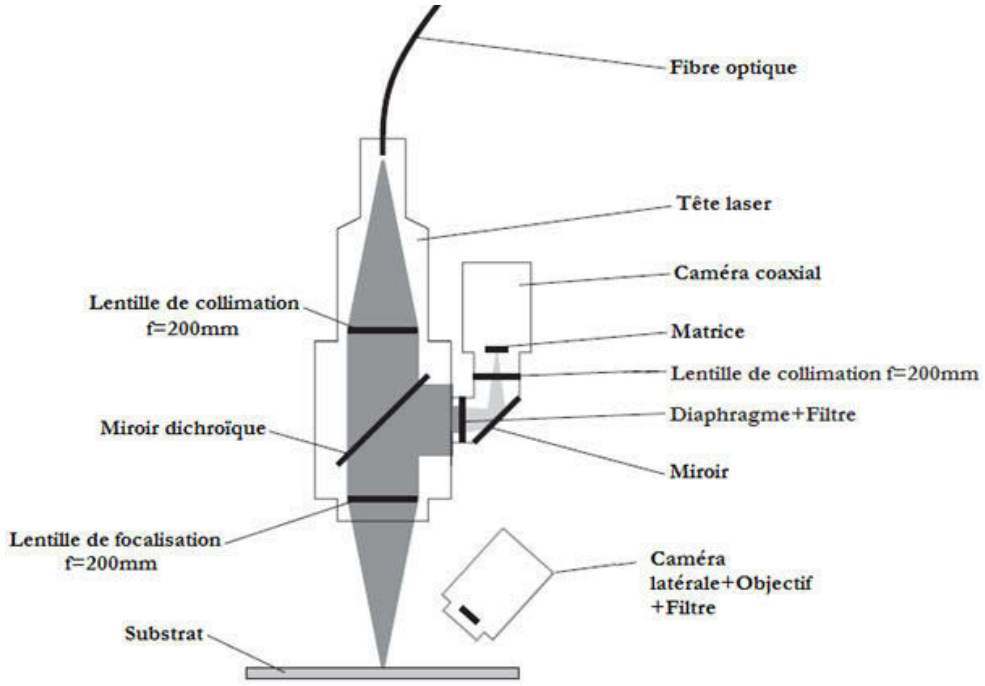


Figure II.49 – Schéma simplifié du montage expérimental

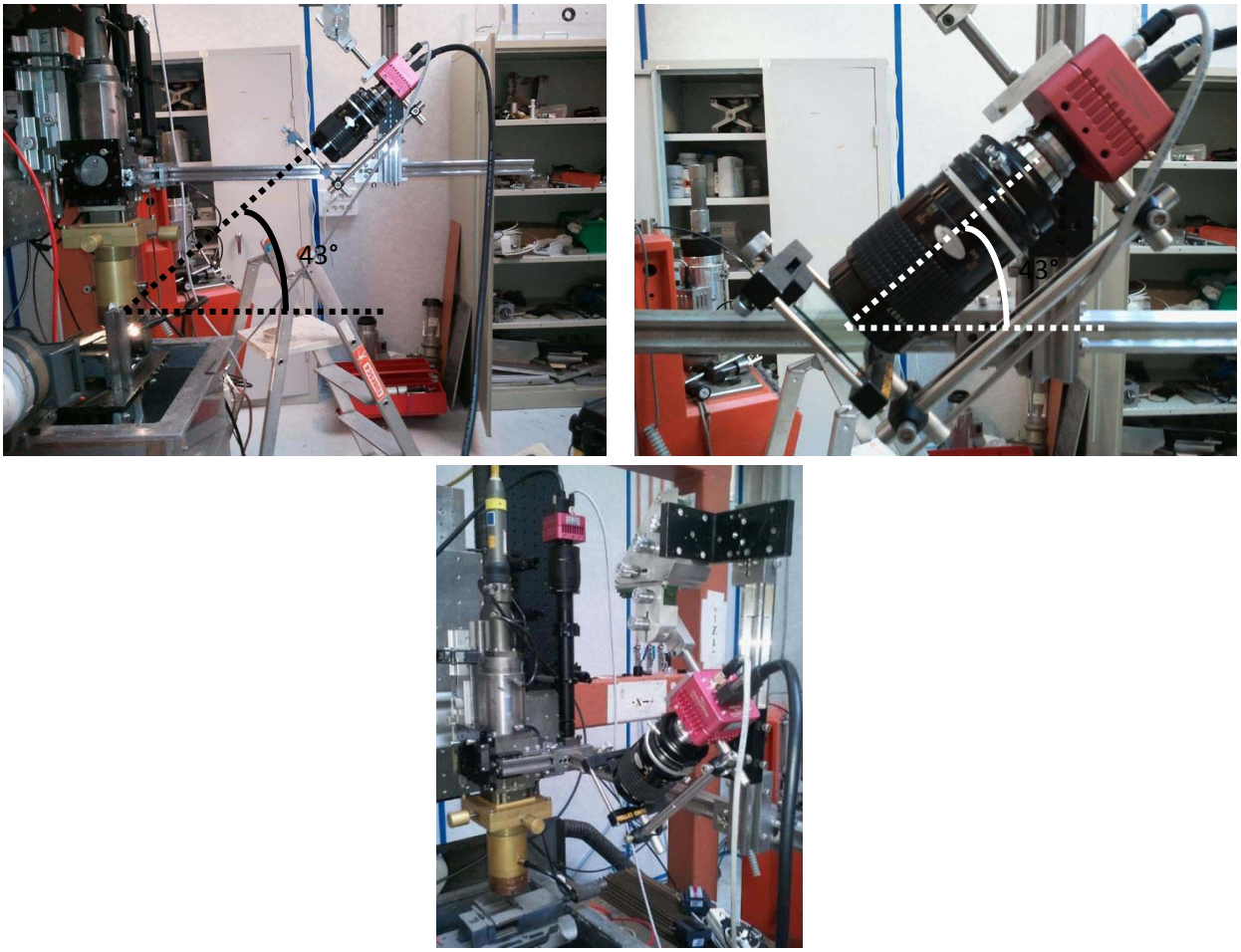


Figure II.50 – Photographies du montage expérimental

La caméra latérale est utilisée avec un filtre passe-bas éliminant la longueur d'onde du rayonnement laser (Filtre KG3). Des filtres à densité neutre permettent d'atténuer la lumière et ainsi éviter la saturation du capteur.

La caméra latérale est située à une distance suffisante (470mm) pour la protéger du flux thermique dégagé à la suite de l'interaction laser-matière et des éjections de poudre. Compte tenu de l'encombrement du montage, la distance de travail était de 470mm. La *formule de conjugaison des lentilles* a permis de dimensionner le système optique de notre montage[51]. Un agrandissement important était nécessaire pour visualiser le bain liquide, d'où l'utilisation d'un objectif de focal élevé (105mm).

La caméra est fixée sur des socles mobiles réglables suivant les trois axes à l'aide de vis micrométriques. Cette mécanique permet de positionner la caméra afin que le système (c'est-à-dire l'ensemble caméra/objectif) respecte la contrainte de point de vue.

Pour assurer une bonne vision du bain, une étape de positionnement des capteurs est nécessaire. Elle consiste à étudier le placement de la caméra et son effet sur l'acquisition de l'image. L'image d'un réglet sert comme un repère pour le positionnement des capteurs dans le champ de la caméra. L'angle optimal trouvé qui nous permettait d'avoir une bonne vision du bain dans toutes les

[51] On peut également utiliser, le logiciel libre MachVis (http://www.qioptiq.com/) pour choisir l'objectif. Il suffit de lui donner la distance de travail, la taille de l'objet, la taille du capteur et la monture.

directions était de 43°. Un verre est placé devant l'objectif de la caméra afin de toujours protéger ce dernier du flux thermique et des éjections de poudre.

II.6.5.2 Développement du modèle du bain

Les paragraphes suivants présentent nos travaux concernant la mesure de l'incrément en Z par triangulation passive. Le principe de mesure repose sur les images fournies par la caméra coaxiale et la caméra latérale, sachant qu'à notre connaissance aucune étude ne prend part à cette démarche pour le calcul en Z. L'ensemble des éléments permettant l'acquisition des images est illustrée sur la Figure II.50. *Les différentes étapes composant cette méthode, sont :*

1. Calibrage des caméras permettant l'obtention des paramètres intrinsèques et extrinsèques du système des deux caméras.
2. Modélisation du bain liquide
3. Extraction des indices visuels 2D et mise en correspondance des points
4. Recalage modèle image permettant la mesure en Z du bain liquide

II.6.5.2.1 Calibration des caméras

La calibration des caméras concerne l'estimation des fonctions de projection (u; v) = g (X; Y;Z) et rétro-projection (X; Y;Z) = g (u; v) qui définissent les relations entre un point 3D de l'espace (X,Y,Z) et un point 2D dans le plan image (u,v).* Traditionnellement, ces fonctions sont décrites par des modèles paramétriques et la calibration du capteur se rapporte alors à l'estimation des paramètres définissant ce modèle. Il s'agit des paramètres intrinsèques qui décrivent les caractéristiques propres au système d'acquisition et les paramètres extrinsèques qui décrivent la position relative du capteur vis à vis d'un repère monde.

La calibration de caméra s'est fait grâce à « *The camera calibration MATLAB Toolbox* » du CallTech Institute. La procédure de calibrage commence par l'acquisition de plusieurs images d'une mire visible en entier par la caméra (Figure II.51) en faisant varier la position de celle-ci.

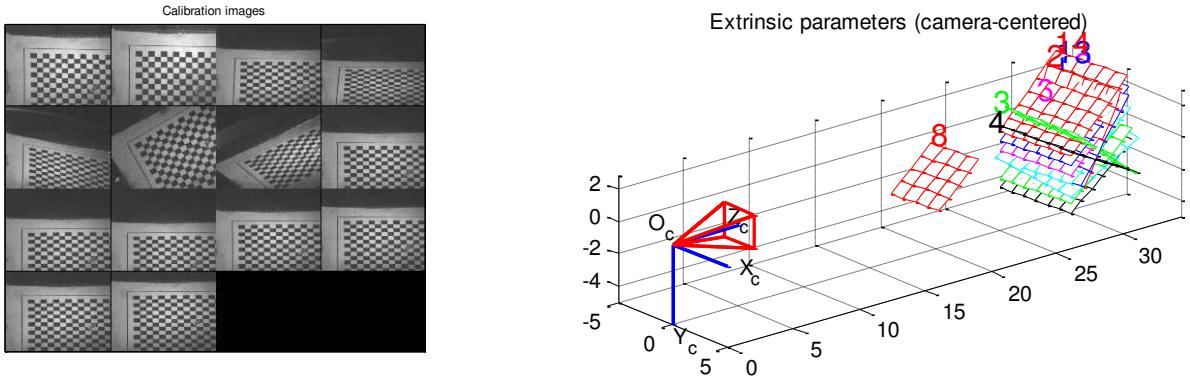


Figure II.51 – Mire de calibrage et projection des positions utilisées.

Les points d'intérêt des images sont détectés puis les paramètres intrinsèques (focale, centre optique) et extrinsèques (position repère monde de la caméra par rapport à la scène) sont déterminés. Les coefficients de distorsions radiales et tangentielles sont ensuite estimés par minimisation de la fonction de maximum de vraisemblance.

Les résultats obtenus à l'aide the camera calibration MATLAB Toolbox montre l'absence de distorsions et se rapportent au modèle de projection orthographique (*projection parallèle*) qui est un cas limite de la projection perspective pour lequel la focale f tend vers l'infini. Les rayons lumineux sont alors parallèles entre eux et parallèles à l'axe optique. Le modèle de projection orthographique

établissant la relation entre un point 3D Q_c = (X_c, Y_c, Z_c, 1) défini dans un référentiel caméra R_c et sa projection q = (u, v, 1) exprimée dans un référentiel pixel R_p s'écrit alors comme suit :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} k_u & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}^{K_o} \overbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}^{O_I} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{(II.11)}$$

K_o est définie comme la matrice homogène des paramètres intrinsèques pour une projection orthographique dépendant du nombre de pixels par unité de longueur sur chacun des axes (k_u; k_v), des coordonnées du centre de l'image (u_0; v_0) dans R_p et O_I est la matrice homogène de projection orthographique.

II.6.5.2.2 Modélisation du bain liquide

II.6.5.2.2.1 Définition du modèle du contour du bain

L'idée est de déterminer une courbe qui permet de représenter les contours du bain liquide. Après observation de plusieurs images du bain prises par les deux caméras sous différents points de vue ; on a constaté que la forme du bain liquide à l'état stationnaire peut être approximé par deux ellipses inscrites sur une superellipsoïde. D'un point de vue physique, *ce format elliptique du bain liquide se justifie par l'effet des mouvements de Marangoni*, comme il a été démontré dans [71] et aussi par les travaux de [6] dans les calculs des hauteurs des ménisques.

La forme générale d'une superellipsoïde est définie par l'équation suivante :

$$\begin{cases} x = c1.abs(cos(\theta))^{n1}.sign(cos(\theta)).abs(cos(\varphi))^{n2}.sign(cos(\varphi)) \\ y = c2.abs(sin(\theta))^{n1}.sign(sin(\theta)).abs(\cos(\varphi))^{n2}.sign(cos(\varphi)) \\ z = c3.abs(sin(\varphi))^{n2}.sign(sin(\varphi)) \end{cases} \quad \text{(II.12)}$$

Avec :

- $c1,c2,c3$: dimensions (taille) de la superellipsoïde en x, y et z
- $n1,n2$: indices de circularité avec $n1, n2 \in \mathbb{R}$: la courbure latitudinale et longitudinale de la forme
- θ,φ : paramètres angulaires polaires avec : $\theta \in [0,2\pi]$et $\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$

L'analyse initiale de la géométrie du bain permet de simplifier l'équation de la superellipsoïde et en imposant $n2=1$ dans un premier temps (bain à section ellipsoïdale observée expérimentalement). On obtient :

$$\begin{cases} x = c1.abs(\cos(\theta))^{n1}.sign(\cos(\theta)).\cos(\varphi) \\ y = c2.abs(\sin(\theta))^{n1}.sign(\sin(\theta)).\cos(\varphi) \\ z = c3.\sin(\varphi) \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

Afin de pouvoir modéliser le contour du bain par la suite, on propose de *modéliser ce contour par deux ellipses inscrites sur la superellipsoïde* (Figure II.52). La méthode de calcul permet autant que possible d'adapter le contour avec peu de paramètres afin de coller au mieux au contour du bain en conditions différentes (début ou fin de cordon, recouvrement, début de construction…).Dans notre cas, les centres des deux ellipses seront concourants au centre de la superellipsoïde. Les plans supports de ces ellipsoïdes sont définis par un angle de rotation autour de l'axe X. Deux paramètres définissent donc ces deux courbes :

Pour l'ellipse arrière on a $\theta = -\pi/2, \varphi = al_1$

Pour l'ellipse avant on a $\theta = \pi/2, \varphi = al_2$

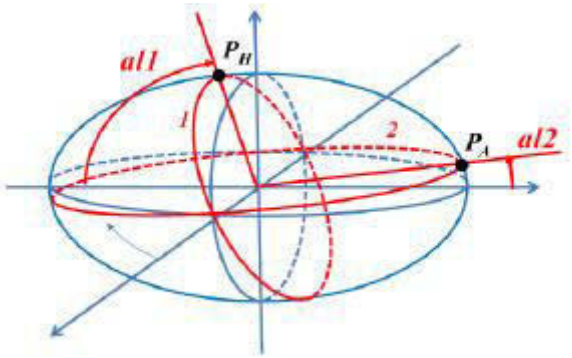


Figure II.52 – Les deux cercles support du contour du bain

La première ellipse définit le contour arrière du bain liquide et la deuxième ellipse le contour bas et avant du bain liquide. Le contour final du bain sera calculé par combinaison des deux équations.

L'équation des ellipsoïdes se fait de la manière suivante (les angles indiqués sont ceux du vecteur directeur du plan portant les deux ellipses):

$$\theta = \frac{\pi}{2};\ \varphi = \frac{\pi}{2} - al_1 \text{ ; et } \begin{cases} v1_x = 0 \\ v1_y = \sin(al_1) \\ v1_z = \cos(al_1) \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

La contrainte de plan conduit à:

$$\varphi_1(\theta) = \tan^{-1}\left(\frac{v1_x.c1.abs(\cos(\theta))^{n1}.sign(\cos(\theta)) + v1_y.c2.abs(\sin(\theta))^{n1}.sign(\sin(\theta))}{-v1_z.c3}\right) \quad \text{(II.15)}$$

On peut écrire la même équation pour le deuxième cercle support : $\theta = -\frac{\pi}{2};\ \varphi = \frac{\pi}{2} - al_2$

$$\begin{cases} v2_x = 0 \\ v2_y = -\sin(al_2) \\ v2_z = \cos(al_2) \end{cases} \quad \text{(II.16)}$$

puis calcul de φ_2 par l'équation ci-dessus (II.15).

On peut calculer les points de l'ellipse 1 et 2 par l'équation II.12 en prenant $(\theta, \varphi_1(\theta))$ et $(\theta, \varphi_2(\theta))$.

Ceci dit, nous cherchons l'équation du contour du bain. Donc, il faut définir une loi de mélange des deux courbes. On propose de définir une loi en fonction de θ qui combine les deux angles $\varphi_1(\theta)$ et $\varphi_2(\theta)$.

Cette loi doit pouvoir coller au mieux au contour du bain. On a plusieurs propositions :

- *Proposition 1*

$$r1 = \frac{1 - abs(sin(\theta))^{nc}.sign(sin(\theta))}{2} \quad \text{(II.17)}$$

Avec $nc = 0.01 + 0.5abs(cos(\theta))^8$

- *Proposition 2*

$$r1 = \left(\frac{1 - abs(\sin(\theta))^{p3}.sign(\sin(\theta))}{2}\right)\left(\frac{1 - abs(\sin(\theta))^{p1}.sign(\sin(\theta))}{2}\right) + \left(\frac{1 + abs(\sin(\theta))^{p3}.sign(\sin(\theta))}{2}\right)\left(\frac{1 - abs(\sin(\theta))^{p2}.sign(\sin(\theta))}{2}\right) \quad \text{(II.18)}$$

Avec $0 < p1, p2, p3 < 1$

$p1$ conditionne le contour à suivre de l'ellipse génératrice arrière plus ($p1$ petit) ou moins ($p1$ proche de 1) en tenant plus ou moins compte de l'autre génératrice. On a pris $p1 = 1/10$.

$p2$ conditionne le contour à suivre de l'ellipse génératrice avant plus ($p2$ petit) ou moins ($p2$ proche de 1) en tenant plus ou moins compte de l'autre génératrice. On a pris $p2 = 6/10$

$p3$ s'intègre à la partie de la formule qui permet de passer continument de la partie 1 à la partie 2. On doit donc prendre $p3$ très petit. On a pris $p3 = 1/10$.

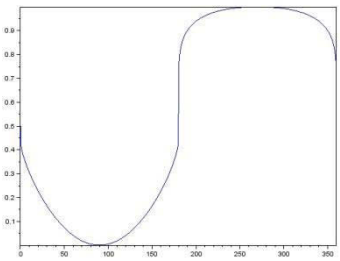


Figure II.53 – $r1 = f(\theta_{degrés})$

Et donc la courbe définissant le contour du bain liquide sera défini par $(\theta, \varphi_b(\theta))$ tel que

$$\varphi_b(\theta) = r1\varphi_1(\theta) + (1 - r1)\varphi_2(\theta) \quad \text{(II.19)}$$

Finalement, le contour du bain $P(\theta)\begin{pmatrix} x_P(\theta) \\ y_P(\theta) \\ z_P(\theta) \end{pmatrix}$ peut être calculé suivant un seul paramètre θ à partir de l'équation II.11. On a donc (Equation II.13) :

$$\begin{cases} x_b = c1.abs(\cos(\theta))^{n1}.sign(\cos(\theta)).\cos(\varphi_b(\theta)) \\ y_b = c2.abs(\sin(\theta))^{n1}.sign(\sin(\theta)).\cos(\varphi_b(\theta)) \\ z_b = c3.\sin(\varphi_b(\theta)) \end{cases} \quad \text{(II.20)}$$

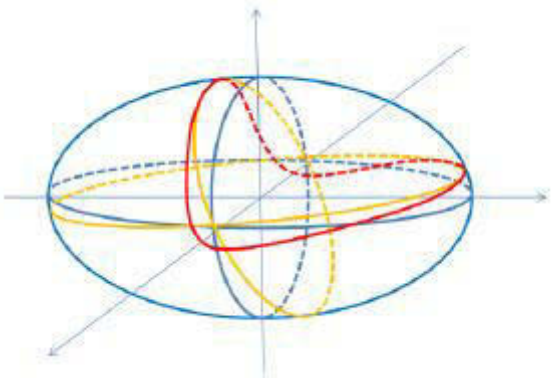


Figure II.54 – Contour du bain (en rouge)

Il n'est pas nécessaire de calculer tous les points pour le calcul du contour final. Nous verrons plus loin comment procéder.

En plus du contour du bain, deux points particuliers peuvent être calculés :

- *Le point au sommet de l'arrière du bain* : $P_H(\theta = -\frac{\pi}{2}, \varphi_b(\theta))\begin{pmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{pmatrix}$. Dans la configuration standard des deux caméras, il est toujours visible sauf s'il est caché par le cordon.
- *Le point le plus en avant du bain* : $P_A(\theta = \frac{\pi}{2}, \varphi_b(\theta))\begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix}$. On verra que, dans la configuration standard des deux caméras, le point P_A n'est pas toujours visible. Si il est occulté, il correspondra en fait au point $P_{A'}\left(\theta = \frac{\pi}{2}, \varphi_l(\theta)\right)\begin{pmatrix} x_{A'} \\ y_{A'} \\ z_{A'} \end{pmatrix}$ situé sur le limbe.

II.6.5.2.2.2 Identification des parties cachées (Calcul du contour de limbe)

Certains contours du bain liquide sont cachés et ne peuvent être vus par la caméra. Sur l'ellipsoïde, les parties cachées sont définies par le contour de limbe.

Le contour de limbe est défini par l'ensemble des points M situés sur la surface pour lesquels le vecteur directeur du plan normal à la surface en ces points $\overrightarrow{V_l(M)}$ est perpendiculaire au vecteur directeur de vision $\overrightarrow{CM}$, avec C le centre optique ; et donc $\overrightarrow{V_l(M)}.\overrightarrow{MC} = 0$.

Dans notre cas, la distance focale est assez grande et le champ de vision très réduit (~15mm), ce qui correspond à un écart angulaire très petit entre les extrémités du champ de vision (<3°). Afin de réduire la complexité des calculs, nous pouvons nous mettre dans des conditions de projection parallèle (justifier par analyse en calibration, Cf. §II.6.5.2.1). L'ensemble des calculs de projection se fera donc en projection parallèle sans fausser les résultats.

D'autre part, l'équation de la superellipsoïde avec $n1 \in]0,1]$ entraine la propriété suivante :

Le contour de limbe sur une superellipsoïde définie par l'équation II.12 avec $n1 \in]0,1]$ *est une courbe continue unique et fermée*

Il faut, dans tous les cas calculer le vecteur directeur du plan tangent en chaque point de la surface. Dans le cas des cordonnées polaires (θ, φ) il est aisé de calculer deux vecteurs orthogonaux de ce plan au point $P\begin{pmatrix} x(\theta,\varphi) \\ y(\theta,\varphi) \\ z(\theta,\varphi) \end{pmatrix}$. On a :

$$\overrightarrow{\frac{\partial P}{\partial \theta}}\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial \theta} = -c1.n.\mathrm{abs}(\sin(\theta))^{n1-1}.\cos(\varphi) \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} = c2.n.abs(\sin(\theta))^{n1-1}.\cos(\varphi) \\ \frac{\partial z}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \overrightarrow{\frac{\partial P}{\partial \varphi}}\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial \varphi} = -c1.\mathrm{abs}(\cos(\theta))^{n1}.\sin(\varphi) \\ \frac{\partial y}{\partial \varphi} = -c2.\mathrm{abs}(\sin(\theta))^{n1}.\sin(\varphi) \\ \frac{\partial z}{\partial \varphi} = c3.\cos(\varphi) \end{cases} \qquad \text{(II.21)}$$

Finalement, on obtient le vecteur $\overrightarrow{V_P} = \overrightarrow{\frac{\partial P}{\partial \theta}} \wedge \overrightarrow{\frac{\partial P}{\partial \varphi}}$ et donc

$$\overrightarrow{V_\perp(M(\theta,\varphi))}\begin{cases} vx_\perp = \frac{\partial y}{\partial \theta}\frac{\partial z}{\partial \varphi} - \frac{\partial z}{\partial \theta}\frac{\partial y}{\partial \varphi} \\ vy_\perp = \frac{\partial z}{\partial \theta}\frac{\partial x}{\partial \varphi} - \frac{\partial x}{\partial \theta}\frac{\partial z}{\partial \varphi} \\ vz_\perp = \frac{\partial x}{\partial \theta}\frac{\partial y}{\partial \varphi} - \frac{\partial y}{\partial \theta}\frac{\partial x}{\partial \varphi} \end{cases} \qquad \text{(II.22)}$$

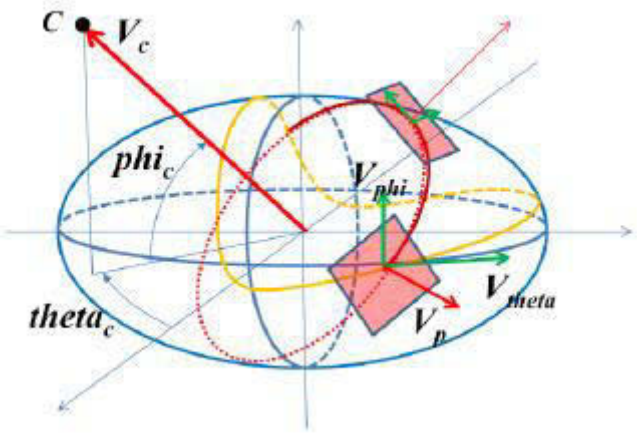


Figure II.55 – Calcul des plans tangents et contour de limbe (en rouge)

Avec l'approximation en projection parallèle, on peut calculer cette courbe par rapport uniquement au paramètre θ en ayant comme précédemment exprimé $\varphi_l(\theta)$ en fonction de θ. En effet, pour les points M du contour de limbe on a :

$$R(M) = \overrightarrow{V_l(M)}.\overrightarrow{OC} = 0 \tag{II.23}$$

Avec $O(0,0,0)$ centre de la superellipsoïde et $C(vc_x,vc_y,vc_z)$ la position du centre optique de vision, pour un axe de vision défini par le vecteur $\overrightarrow{OC}\begin{pmatrix} vc_x = c1\cos(\theta_c).\cos(\varphi_c) \\ vc_y = c2.\sin(\theta_c).\cos(\varphi_c) \\ vc_z = c3.\sin(\varphi_c) \end{pmatrix}$ qui peut être calculé à partir des angles (θ_c, φ_c). On aura alors :

$$\varphi_l(\theta) = \tan^{-1}\left(-\frac{vc_x.c1.c3.abs(\cos(\theta))^{2-n1}.sign(\cos(\theta)) + vc_y.c2.c3.abs(\sin(\theta))^{2-n1}.sign(\sin(\theta))}{vc_z.c1.c2}\right)$$

(II.24)

et donc le calcul du limbe (x_l, y_l, z_l) sera le suivant pour $\theta \in [0,2\pi]$

$$\begin{cases} x_l = c1.abs(\cos(\theta))^{n1}.sign(\cos(\theta)).cos(\varphi_l(\theta)) \\ y_l = c2.abs(\sin(\theta))^{n1}.sign(\sin(\theta)).\cos(\varphi_l(\theta)) \\ z_l = c3.\sin(\varphi_l(\theta) \end{cases} \tag{II.25}$$

II.6.5.2.2.3 Calcul du contour du bain effectif en projection parallèle

On peut maintenant calculer le contour du bain en projection parallèle défini par les deux ellipses et en prenant en compte l'occultation d'une partie du contour.

On calcule d'abord le vecteur directeur perpendiculaire au plan tangent pour M appartenant à la courbe du bain. Si $M \in courbe\_du\_bain$ alors on a $M(\theta, \varphi_c(\theta))$, voir plus haut. Il suffit alors de calculer :

$$\overrightarrow{V_\perp(M(\theta,\varphi_b(\theta)))} = \frac{\overrightarrow{\frac{\partial M(\theta,\varphi_b(\theta))}{\partial\theta}} \wedge \overrightarrow{\frac{\partial M(\theta,\varphi_b(\theta))}{\partial\varphi}}}{\left\| \overrightarrow{\frac{\partial M(\theta,\varphi_b(\theta))}{\partial\theta}} \wedge \overrightarrow{\frac{\partial M(\theta,\varphi_b(\theta))}{\partial\varphi}} \right\|} \tag{II.26}$$

Remarque : pour le reste des calculs, il ne sera pas nécessaire de normaliser les vecteurs.

Si on fait la remarque selon laquelle les points visibles M de la surface de la superellipsoïde depuis un point de vision C, et en prenant l'approximation de projection parallèle, sont tels que :

$R(M) = \overrightarrow{V_\perp(M(\theta,\varphi_b(\theta)))}.\overrightarrow{OC} \geq 0$ avec $\overrightarrow{V_\perp(M(\theta,\varphi(\theta)))}$ le vecteur directeur du plan tangent à la surface au point $(\theta,\varphi(\theta))$, on peut alors proposer l'algorithme suivant :

Pour $P(\theta,\varphi(\theta)) \in contour\_bain\ \_visible$ et pour $\theta \in [0,2\pi]$ on a :

$$\begin{cases} P(\theta,\varphi(\theta)) = P(\theta,\varphi_b(\theta)) \quad si\ \overrightarrow{V_\perp(P(\theta,\varphi(\theta)))}.\overrightarrow{OC} > 0 \\ P(\theta,\varphi(\theta)) = P(\theta,\varphi_l(\theta)) \quad sinon \end{cases} \tag{II.27}$$

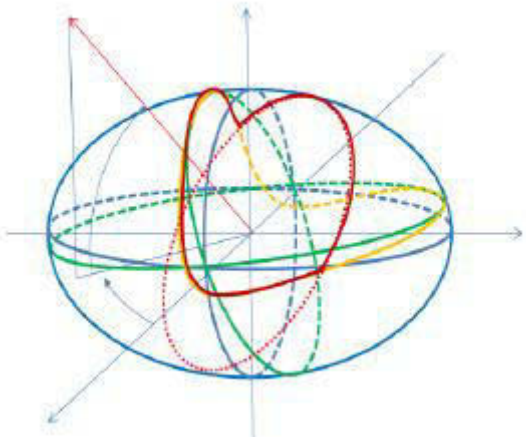
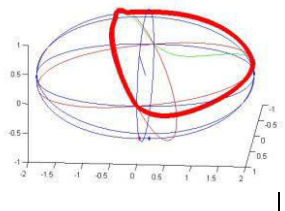
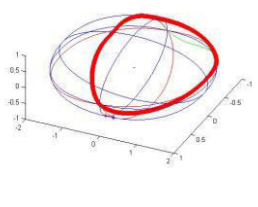
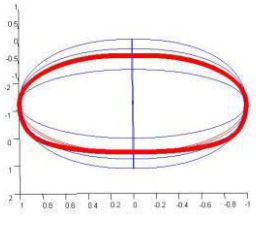
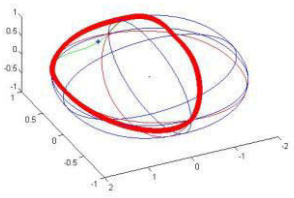
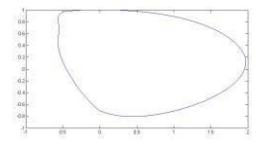
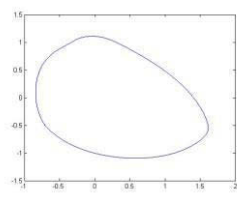
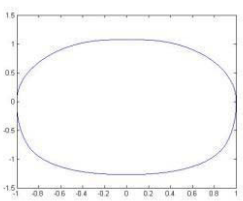
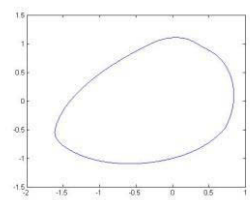


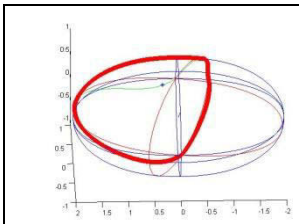
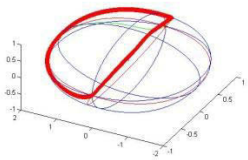
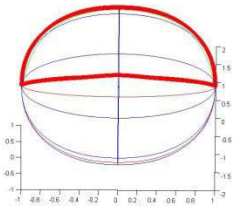
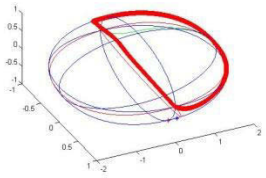
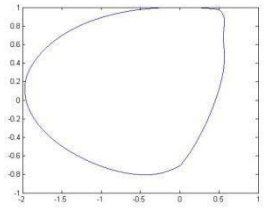
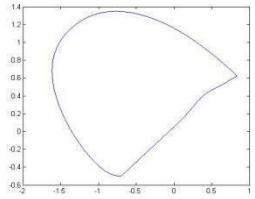
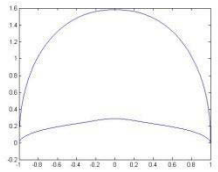
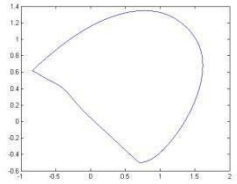
Figure II.56 – Le contour effectif après calcul pour un vecteur de vision donné (en rouge)

Voici quelques résultats pour une configuration donnée :

- *c1=1,c2=2,c3=1* : dimensions de la superellipsoïde en x, y et z
- $al_1 = 60°$, $al_2 = 5°$,
- *n1=9/10, n2=1*
- *φ=45°*
- On fait varier θ dans l'intervalle $[0,2\pi]$

On présente à chaque fois une vue 3D et la vue 2D en projection parallèle

			
			
θ=0°	*θ=45°*	*θ=90°*	*θ=135°*

			
			
θ=180°	θ=225°	θ=270°	θ=315°

II.6.5.2.2.4 Identification du modèle

Les paramètres du modèle peuvent être identifiés à partir des mesures dans les images coaxiales et latérales.

II.6.5.2.2.4.1 Identification à partir de l'image coaxiale

L'image coaxiale permet de mesurer :

- L'orientation du bain θ_c est calculée à partir de l'image coaxiale :
  - En calculant la direction du vecteur $\overrightarrow{C_R C_B}$ ou C_R est le centre de rotation du bain (identifié dans les images coaxiales et latérales par l'impact laser en statique ou analyse d'images cumulées) et C_B et le barycentre de la zone seuillée (en principe le bain liquide).
  - En calculant la direction principale de l'ellipse englobante de la zone seuillée.
- φ_c est donné par la calibration de caméra.
- $C1$: donné par la mesure de la largeur du bain
- $C3$: donné par la longueur du bain si $al1$ est fixé. On procède de la manière suivante :
  - Calcul de la boite englobante du bain (dans la direction principale du bain $\overrightarrow{P_H P_A}$, à estimer par le traitement d'images). On obtient deux paramètres lab (largeur du bain) et lob (longueur du bain).
  - Si on a fixé a priori $al1$ on aura $lab=2.c1$
  - Sur l'axe médian de la surface seuillée dans l'image on calcule lob', la distance entre une extrémité et l'autre (qui peut être différente de lob).
  - Sur la forme 3D, cette distance lob' correspond à $\left\|\overrightarrow{P_H P_A}\right\|$ et on a $lob = \left\|\overrightarrow{P_H P_A}\right\| = y_A + y_H$. Donc $\left\|\overrightarrow{P_H P_A}\right\| = c2 + y_H$
  - On fait alors la mise en correspondance telle que $P_H^{2D} \rightarrow P_H$, $P_A^{2D} \rightarrow P_A$ avec $\left\|\overrightarrow{P_H^{2D} P_A^{2D}}\right\| = lob'$ et on aura $lob' = c2(1+\cos(al1))$. Finalement : $c2 = \frac{lob'}{(1+\cos(al1))}$

- On a $n2=1$ (ou on prend a priori $n2=1$) et $n1=9/10$, à ajuster éventuellement sur les images. On pourrait ajuster $n1$ par analyse de la forme du front avant du bain (pas d'implémentation pour le moment).
- Si on a fixé a priori le front arrière sur un cercle (ou l'ellipse génératrice est une cercle), on aura : $c3=c1$.

II.6.5.2.2.4.2 Identification à partir de l'image latérale

On pourra vérifier la valeur de $c3$ par analyse de l'image latérale (éventuellement avec un petit ajustement par itérations successives) ou possiblement lors du redimensionnement de la fenêtre image.

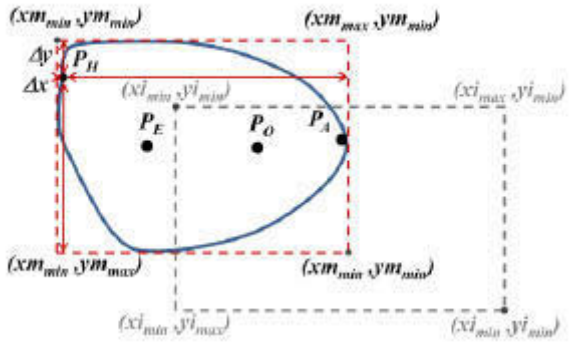
II.6.5.2.3 Recalage modèle image et mesure en Z

Le domaine du recalage d'images est un domaine de recherche très vaste et couvrant plusieurs domaines d'application. L'état de l'art est complexe du fait du nombre de méthodes existantes et ne présente pas d'intérêt dans le cadre de ces travaux. Cependant, afin de choisir une méthode adaptée à notre problématique, il convient tout d'abord de définir quelle famille de techniques de recalage convient. Globalement, les méthodes de recalage sont réparties en deux familles : les méthodes géométriques et iconiques. Les méthodes géométriques se basent sur l'identification des caractéristiques géométriques communes aux images à recaler. Ces caractéristiques sont souvent des primitives de l'image comme les arêtes ou des coins dont les coordonnées spatiales sont appariées afin de déterminer la transformation entre les deux images. Les méthodes iconiques consistent à optimiser un critère de ressemblance (mesure de similarité) fondé sur l'intensité des pixels des images, sans tenir compte de la géométrie de celles-ci. La transformation recherchée est celle pour laquelle la mesure de similarité est maximum. Ces méthodes sont souvent divisées en trois parties : le choix de la mesure de similarité à utiliser (somme des différences au carré, coefficient de corrélation, entropie mutuelle ...), le type de transformation recherchée (rigide, affine, projective ...) et une méthode d'optimisation assurant le lien entre les deux premières étapes.

Dans notre cas, chacune des images du bain liquide met en évidence des indices visuels 2D communs aux deux caméras. Ainsi, les méthodes iconiques basées sur l'information mutuelle entre les images ne sont pas adaptées. Les méthodes de recalage géométriques basées sur une mise en correspondance de points d'intérêt semblent beaucoup plus adaptées.

Les paramètres de la superellipsoïde ont été déterminés dans l'image coaxiale. La mise en correspondance sur l'image latérale se fait comme suit :

1. Calcul de la boite englobante de la zone seuillée dans l'image coaxiale
2. Calcul du contour 2D à partir du modèle 3D identifié et projeté comme décrit ci-dessus.
3. Calcul de la boite englobante du contour projeté
4. Calcul de la boite englobante de la région définie par seuillage dans l'image de la caméra 2 latérale
5. Mise en correspondance des deux boites :
    a. Par mise en correspondance du milieu des deux boites englobantes ou,
    b. Par mise en correspondance de certains côtés de la boite englobante (le ou les plus proches du point P_H.



On a, pour le modèle $\begin{cases} L_m = xm_{max} - xm_{min} \\ H_m = ym_{max} - ym_{min} \end{cases}$, (II.28)

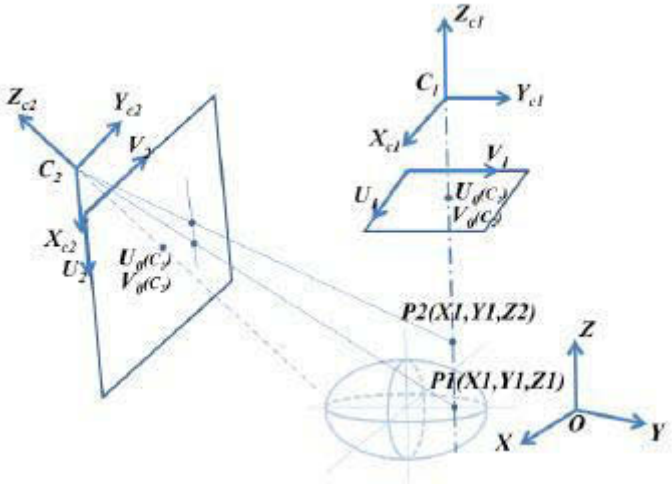
pour l'image $\begin{cases} L_i = xi_{max} - xi_{min} \\ H_i = yi_{max} - yi_{min} \end{cases}$, $\begin{cases} \alpha_x = \Delta x / L_m \\ \alpha_y = \Delta y / H_m \end{cases}$ et $\begin{cases} \Delta L = L_i - L_m \\ \Delta H = H_i - H_m \end{cases}$ (II.29)

Finalement, on a $\begin{cases} xm_{min} = xi_{min} + \alpha_x \Delta L \\ ym_{min} = yi_{min} + \alpha_y \Delta H \end{cases}$ (II.30)

et on peut calculer alors la position des autres points,

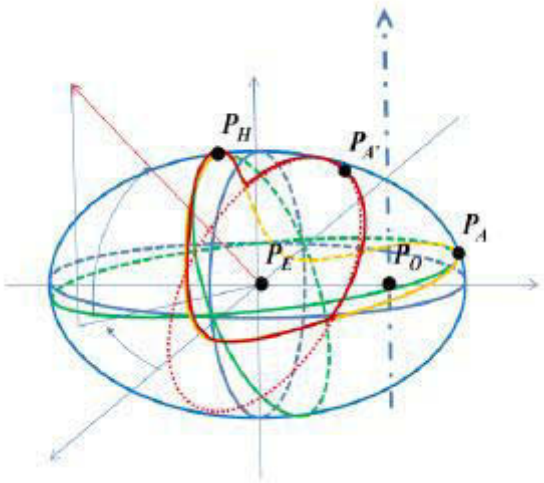
c. Identification des deux boites englobantes par mise à l'échelle des dimensions de la boite modèle sur la boite image. On calcule alors les deux facteurs d'échelle

$$\begin{cases} \beta_x = (\mathrm{xi_{max}} - \mathrm{xi_{min}})/(\mathrm{xm_{max}} - \mathrm{xm_{min}}) \\ \beta_y = (\mathrm{yi_{max}} - \mathrm{yi_{min}})/(\mathrm{ym_{max}} - \mathrm{ym_{min}}) \end{cases} \quad \text{(II.31)}$$



6. Le recalage de la boite englobante du modèle permet de localiser les points :
   - P_E : point origine de la superellipsoïde,
   - P_O : point correspondant à l'axe principal de symétrie (axe optique du laser) : son positionnement dans l'image de la caméra latérale 2 par la méthode ci-dessus permet de déterminer Z_0. C'est la position en hauteur de la superellipsoïde par rapport à la position relative *(0,0,0)* ,

- La position du point P_H dans l'image coaxiale donne directement la position Z_{max} du bain. On peut également obtenir le Z_A du bain à partir de la position du point P_A.



Le calcul de $P_0\ (X_0,Y_0,Z_0)$ peut se faire de plusieurs manières :

- On a $p_1\ (x_1,y_1,1)$ la projection de $P_0\ (X_0,Y_0,Z_0)$ sur le plan image de la caméra 1 et $p_2(x_2,y_2,1)$ la projection de $P_0\ (X_0,Y_0,Z_0)$ sur le plan image de la caméra 2. Si on note $R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}$, en rappelant $\mathbf{R} = [R|T]$, une matrice homogène de changement de base modélisant les paramètres extrinsèques. R est une matrice de rotation et T un vecteur de translation, on aura :

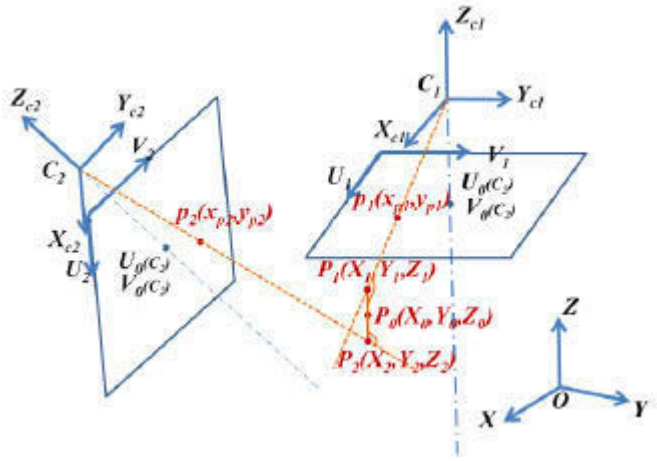
$$Z_0 = \frac{(r_1 - x_2 r_3).T}{(r_1 - x_2 r_3).p_1} = \frac{(r_2 - y_2 r_3).T}{(r_2 - y_2 r_3).p_1} \qquad \text{(II.32)}$$

- On a $p_1 = \mathbf{A_1}.\mathbf{R_1}P = \mathbf{M_1}P$ et $p_2 = \mathbf{A_2}.\mathbf{R_2}P = \mathbf{M_2}P$. Avec $\mathbf{A_1}$ $\mathbf{A_2}$ la matrice des paramètres intrinsèques des deux caméras. La matrice M est appelée matrice de projection.

  On cherche $\mathbf{M}P = 0$ avec $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} P_x.m_{13}^t - m_{11}^t \\ P_x.m_{13}^t - m_{11}^t \\ P_x.m_{13}^t - m_{11}^t \\ P_x.m_{13}^t - m_{11}^t \end{bmatrix}$.

  Finalement *P* est la dernière colonne de la matrice V de la décomposition SDV de A=USV* avec V* matrice conjuguée transposée de V.
- Recherche de l'intersection des deux droites de projection

  On cherche le point équidistant *P* des deux droites de projection générée par p_1 et p_2 à la distance minimale entre ces deux droites (voir figure ci-dessous)



Suivant la dénomination des points et vecteurs ci-dessous, la distance entre deux droites se calcule comme suit :

$$d = \frac{\left|\det(\overrightarrow{C_1C_2}, \overrightarrow{C_1p_1}, \overrightarrow{C_2p_2})\right|}{\left\|\overrightarrow{C_1p_1} \wedge \overrightarrow{C_2p_2}\right\|} = \frac{\left|\overrightarrow{C_1C_2}.(\overrightarrow{C_1p_1} \wedge \overrightarrow{C_2p_2})\right|}{\left\|\overrightarrow{C_1p_1} \wedge \overrightarrow{C_2p_2}\right\|} \quad \text{(II.33)}$$

Si on pose $\begin{cases}\overrightarrow{C_1P_1} = k_1\overrightarrow{C_1p_1} \\ \overrightarrow{C_2P_2} = k_2\overrightarrow{C_1p_2}\end{cases}$, on doit avoir $\begin{cases}\overrightarrow{P_1P_2}.\overrightarrow{C_1p_1} = 0 \\ \overrightarrow{P_1P_2}.\overrightarrow{C_1p_2} = 0\end{cases}$ et on cherche k_1 *et* k_2.

On obtient :

$$\begin{cases} k_1 = \dfrac{\begin{array}{l} v_{x1}.\left(\left(v_{y2}^2 + v_{z2}^2\right).(x_{c2} - x_{c1}) - v_{x2}.v_{y2}.(y_{c2} - y_{c1}) - v_{x2}.v_{z2}.(z_{c2} - z_{c1})\right) + \\ v_{y1}.\left(-v_{x2}.v_{y2}.(x_{c2} - x_{c1}) + \left(v_{x2}^2 + v_{z2}^2\right).(y_{c2} - y_{c1}) - v_{y2}.v_{z2}.(z_{c2} - z_{c1})\right) + \\ v_{z1}.\left(-v_{x2}.v_{z2}.(x_{c2} - x_{c1}) - v_{y2}.v_{z2}.(y_{c2} - y_{c1}) + \left(v_{x2}^2 + v_{y2}^2\right).(z_{c2} - z_{c1})\right) \end{array}}{(v_{x1}.v_{y2} - v_{x2}.v_{y1})^2 + (v_{x1}.v_{z1} - v_{x2}.v_{z1})^2 + (v_{y1}.v_{z2} - v_{y2}.v_{z1})^2} \\ k_2 = \dfrac{\begin{array}{l} v_{x2}.\left(\left(v_{y1}^2 + v_{z1}^2\right).(x_{c2} - x_{c1}) - v_{x1}.v_{y1}.(y_{c2} - y_{c1}) - v_{x1}.v_{z1}.(z_{c2} - z_{c1})\right) + \\ v_{y2}.\left(-v_{x1}.v_{y1}.(x_{c2} - x_{c1}) + \left(v_{x1}^2 + v_{z1}^2\right).(y_{c2} - y_{c1}) - v_{y1}.v_{z1}.(z_{c2} - z_{c1})\right) + \\ v_{z2}.\left(-v_{x1}.v_{z1}.(x_{c2} - x_{c1}) - v_{y1}.v_{z1}.(y_{c2} - y_{c1}) + \left(v_{x1}^2 + v_{y1}^2\right).(z_{c2} - z_{c1})\right) \end{array}}{(v_{x1}.v_{y2} - v_{x2}.v_{y1})^2 + (v_{x1}.v_{z1} - v_{x2}.v_{z1})^2 + (v_{y1}.v_{z2} - v_{y2}.v_{z1})^2} \end{cases}$$

(II.34)

On obtient alors P_1 et P_2. Pour P_0, on peut choisir un des deux points ou le milieu du segment (P_1,P_2).

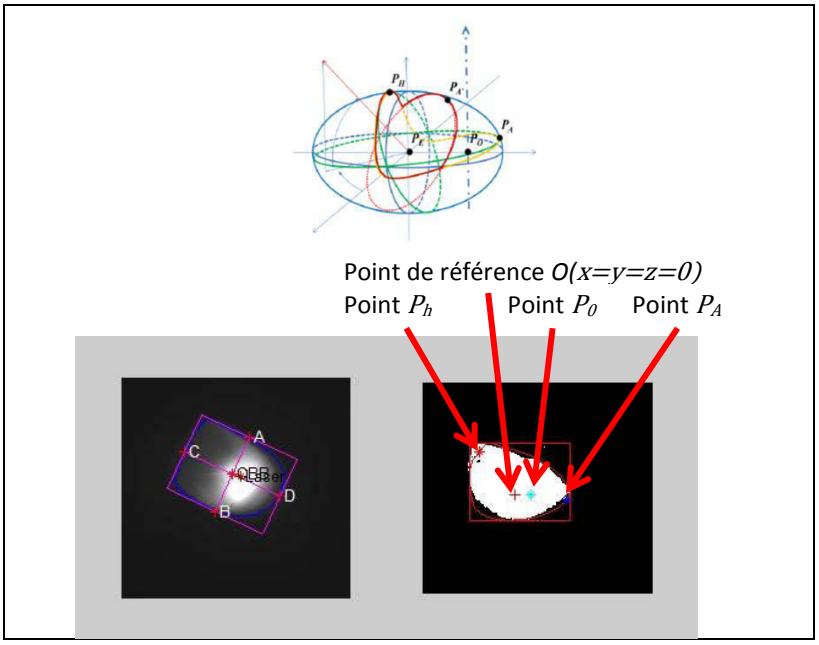
- Recherche de l'intersection des deux droites de projection, autre méthode

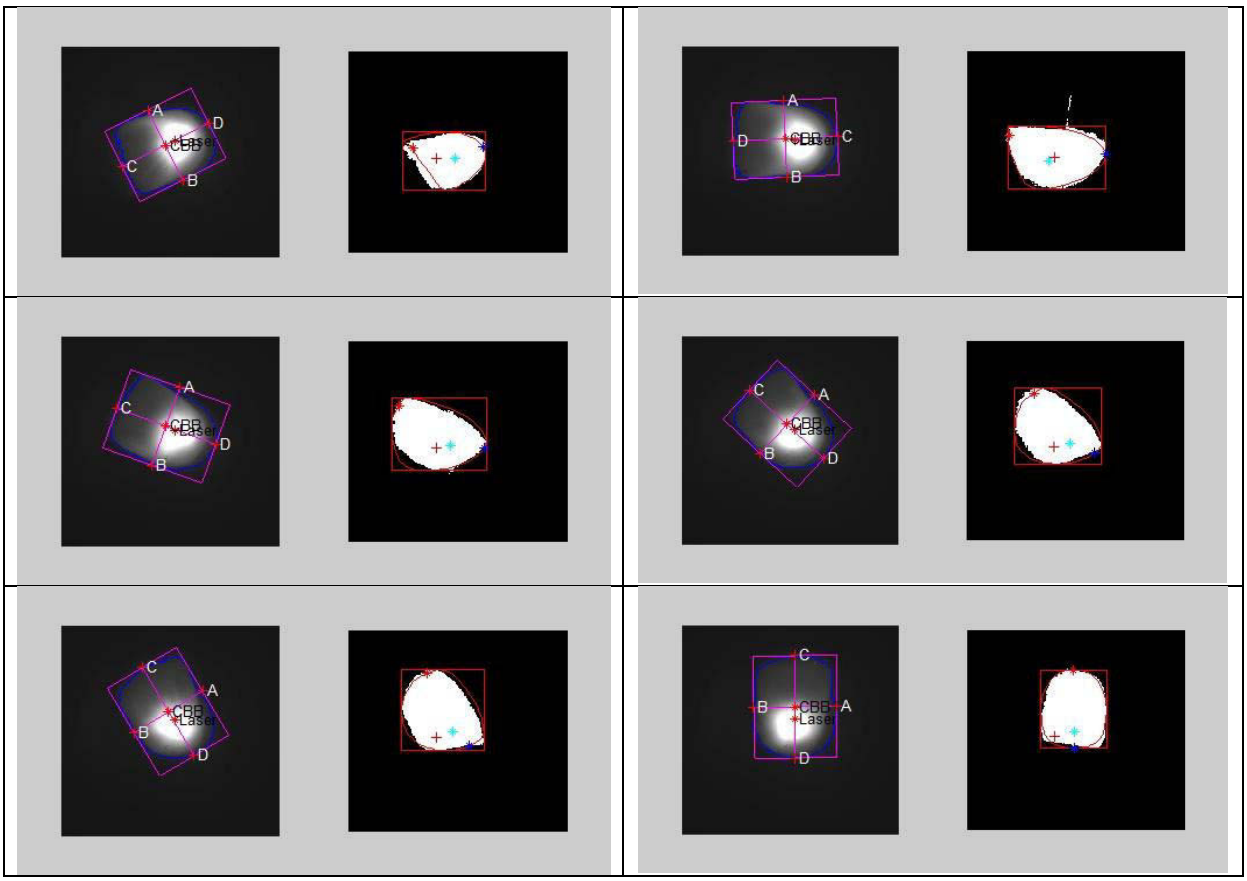
Si on reprend $\begin{cases}\overrightarrow{C_1P_1} = k_1\overrightarrow{C_1p_1} \\ \overrightarrow{C_2P_2} = k_2\overrightarrow{C_1p_2}\end{cases}$, on peut dire que, si la distance minimale entre les deux droites 3D est $\min(\left\|\overrightarrow{P_1P_2}\right\|)$, alors on peut écrire $\begin{cases}\frac{\partial\overrightarrow{P_1P_2}}{\partial k_1} = 0 \\ \frac{\partial\overrightarrow{P_1P_2}}{\partial k_2} = 0\end{cases}$ et on résout ce système de deux équations à deux inconnues k_1 *et* k_2.

II.6.5.2.4 Exemple de mesure en Z

Le système dans l'implémentation décrite ci-dessus a pu être évalué sur des séquences d'images coaxiales et latérales pour plusieurs conditions paramétriques, principalement pour le TA6V.

Les images ci-dessous présentent le calcul de la position en Z du bain sur une séquence de projection laser de TA6V sur une trajectoire circulaire. Ceci permet d'observer le comportement de l'algorithme pour toutes les orientations du bain vis-à-vis de la caméra latérale.





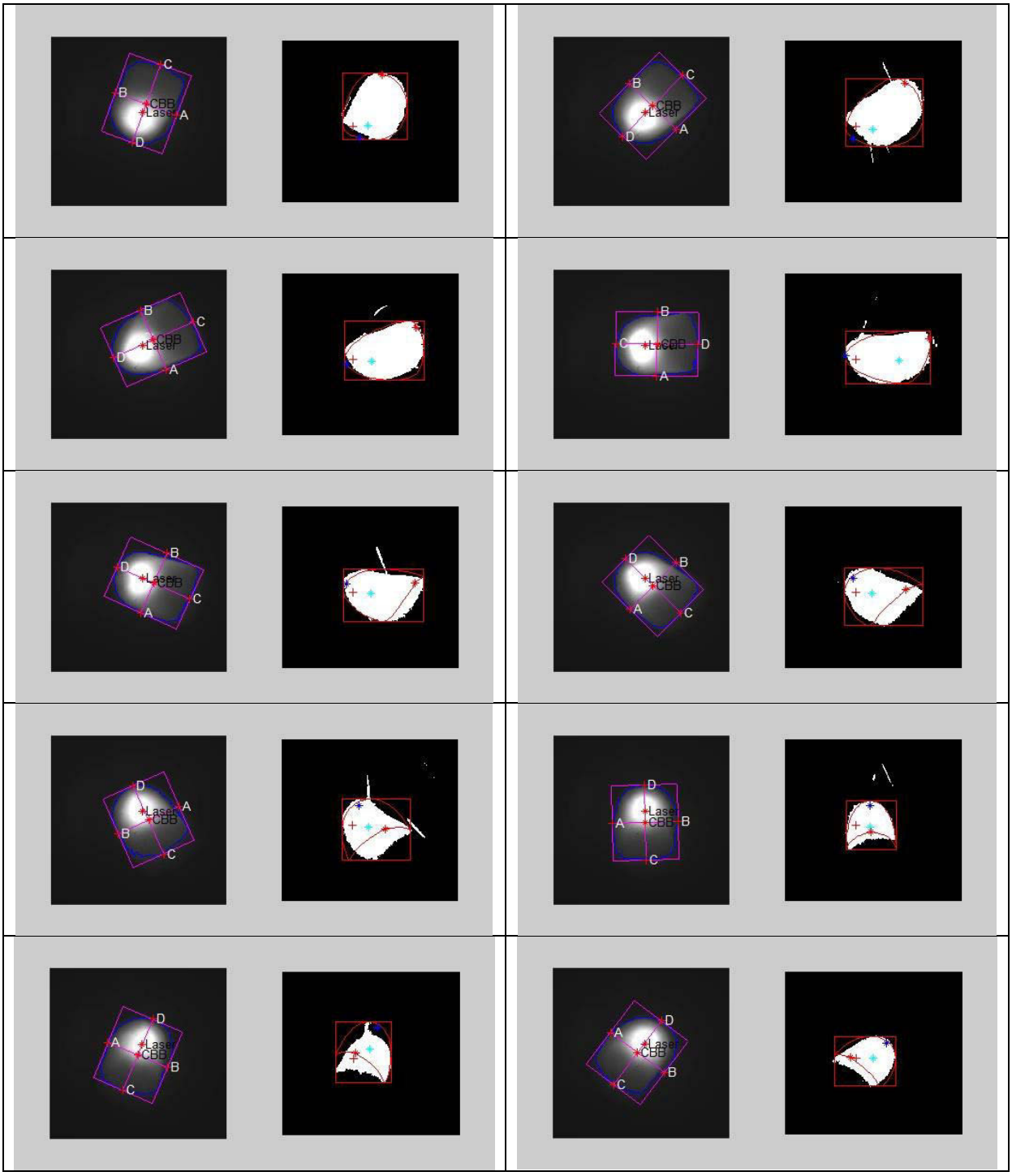


Figure II.57 – Echantillonnage d'une séquence d'images (gauche : image coaxiale, droite : image latérale) avec modèle 3D recalé (de haut en bas, de gauche à droite)

A partir du recalage 3D de cette séquence on peut calculer la position en Z du bain (position du point P_0). La Figure II.58 présente cette position. On constate une très bonne mesure de Z, globalement indépendante de l'orientation du bain.

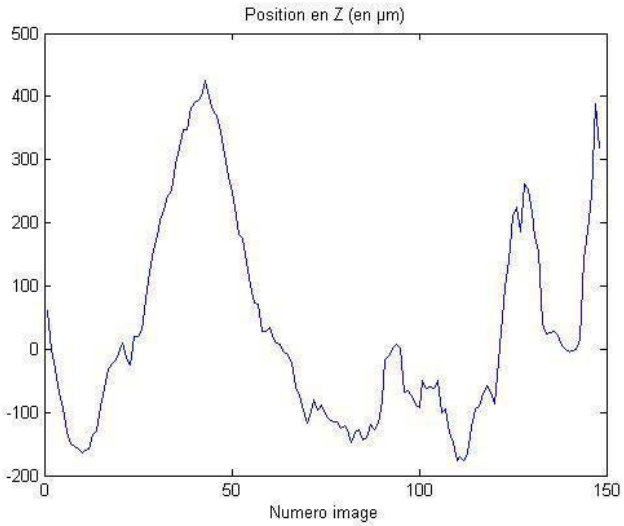


Figure II.58 – Mesure relative de la position en Z (mesuré en microns par la caméra latérale) du bain.

Comme il a été montré, le recalage sur l'image latérale s'effectue ici par un calcul de mise à l'échelle en x et y (indépendamment) des boites englobantes du modèle projeté et de l'image 2D du bain. Il est intéressant de calculer le rapport $r_\beta = \beta_y/\beta_x$. Si le recalage est parfait, on devrait avoir $r_\beta = 1$, c'est-à-dire le même rapport d'échelle sur x et sur y. Comme on peut le voir sur la Figure II.59, ce rapport présente une moyenne autour de 0.6. Ceci peut provenir d'une mauvaise calibration de la caméra latérale et de l'estimation de l'angle d'orientation de cette caméra par rapport à l'horizontale ou bien également de la sous-estimation de l'influence de la projection perspective que la mise à l'échelle vient corriger. Ceci reste à analyser plus en détail. On constate cependant que la mise à l'échelle indépendante en *x* et *y* contribue à la robustesse de la mesure en Z

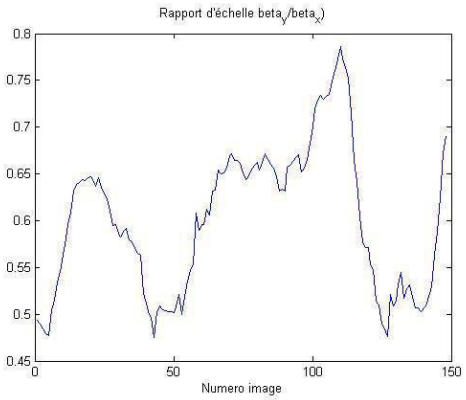


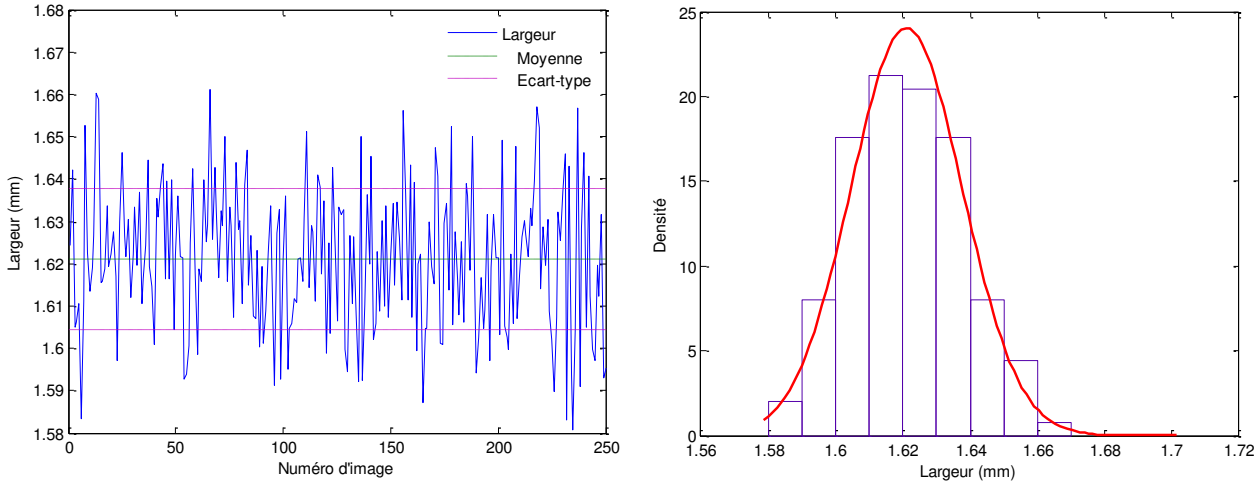
Figure II.59 – Mesure du rapport r_β des facteurs d'échelle

II.6.6 Incertitudes sur les mesures du bain

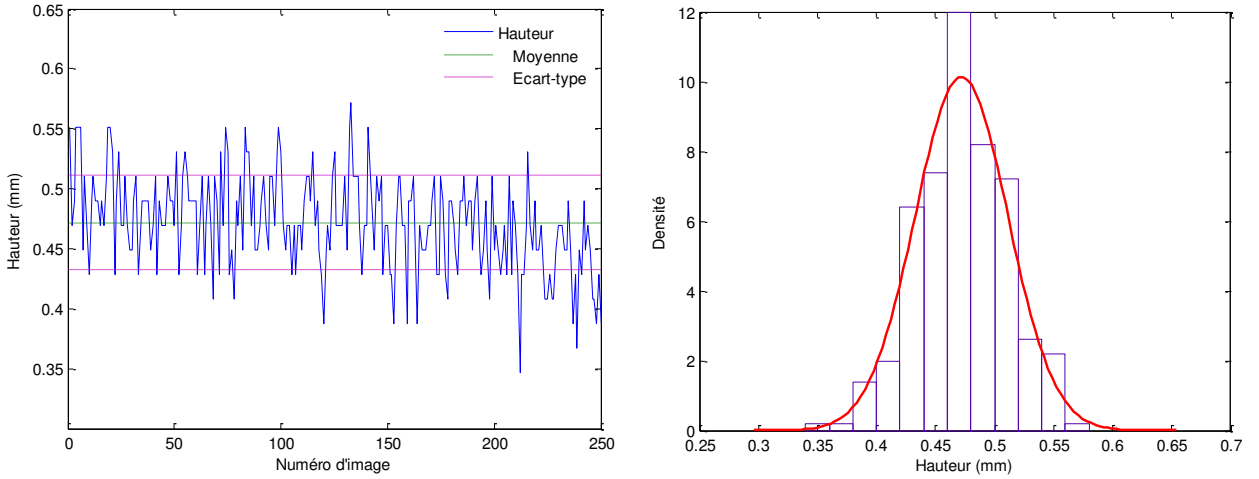
La mesure des dimensions du bain (largeur et hauteur) par vision joue sur le calcul des contours du bain obtenu après seuillage. *Une erreur sur la valeur du seuil est une source d'erreur sur les dimensions du bain mesurées et peut autant la surestimer que la sous-estimer selon que la valeur du seuil soit plus grande ou plus petite que prévu*. Afin d'évaluer l'erreur induite par la valeur du seuil, nous avons testé la sensibilité des dimensions du cordon à la valeur du seuil. Les incertitudes issues de différentes valeurs de seuil sont faibles et font ressortir une dépendance linéaire de la largeur et la hauteur réelle du cordon avec la valeur du seuil.

L'observation du bain liquide par caméra montre que ce dernier fluctue en fonction du temps. Cette fluctuation peut trouver ces origines dans les mouvements de convections du bain liquide. On peut également penser à des bruits de mesures ou des variations de débit du gaz de protection. Pour

étudier ces fluctuations, des enregistrements ont été réalisés sur le dernier cordon d'un mur de 20 couches construit avec vitesse, puissance et débit constants. La Figure II.60 montre les résultats sur un échantillon de 250 mesures.



(a)



(b)

Figure II.60 – Fluctuation des dimensions du bain : (a) la largeur du bain liquide : (b) La hauteur du bain

Supposant que la distribution statistique des résultats autour de la valeur moyenne suit une loi normale, on peut donner un intervalle de confiance à 95 %. Dans notre cas, on a :

	Moyenne	Ecart-type	intervalle de confiance
Largeur (mm)	1.621	0.017	1.621 ± 0.034
Hauteur (mm)	0.472	0.039	0.472 ± 0.078

Tableau II.3 – Les incertitudes de mesures de la largeur et de la hauteur sur un échantillon de 250 mesures

Ces incertitudes restent très faibles par rapport à la largeur ou la hauteur mesurée comprise entre 0.2 et 3 mm, donc nos traitements d'images sont tout à fait pertinents.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons apporté des solutions sur la problématique de suivi en temps réel du bain liquide qui est notre outil de construction de la géométrie de la pièce. Une attention toute particulière a été portée sur la définition d'une méthodologie permettant la mise en place de ce système de mesure, tout en minimisant le coût et l'encombrement des capteurs au sein de la machine, en vue de sa mise en place pour des applications industrielles. Cette méthodologie comprend notamment le choix de capteurs permettant de suivre des paramètres clefs lors de la fabrication, mais aussi des solutions et outils indispensables pour respectivement l'insertion des capteurs et le traitement des données issues de ceux-ci. Plusieurs capteurs à base de caméra (vision passive) ont été testés en respectant les spécifications du procédé, notamment la résolution (liée à la taille du bain liquide et à la largeur du champ de vision), de dynamique, de fiabilité et de la connectivité de l'installation. Les dispositifs coaxiaux n'ont malheureusement pas permis d'atteindre des sensibilités suffisantes pour effectuer des mesures du bain répondant aux exigences de notre application. Les mesures du bain liquide ont donc finalement été réalisées par une méthode originale à base de triangulation. L'expérience acquise à travers la mise en place de ce système de mesure permet d'obtenir les informations géométriques du bain ce qui constituera des données d'entrées pour le contrôle/commande.

CHAPITRE III

Modélisation et identification du procédé

III.1 Introduction

Les modèles représentatifs du procédé de projection laser peuvent être classés en modèles analytiques et modèles expérimentaux, selon la manière dont ils sont obtenus.

Les modèles mathématiques pour les procédés laser sont généralement divisés en deux grands groupes : discrets (modèles à paramètres localisés[52]) et continus (modèles à paramètres distribués[53]) [13]. Ils sont basés sur les lois de la physique ou encore obtenus à partir d'une discrétisation spatiale. Les modèles 2D/3D par éléments finis en sont l'exemple le plus typique. Ils sont adaptés à l'analyse et à la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans le procédé. Un point faible de ce type de modèle est cependant que, en plus d'une laborieuse étape d'obtention d'un modèle analytique, il reste nécessaire de réaliser des recalages et des expériences pratiques pour la validation des paramètres du modèle[54] et de faire correspondre au mieux le comportement du modèle simulé à celui du système réel.

Un modèle analytique permet certes l'analyse de l'évolution des paramètres procédé, néanmoins, quand il s'agit uniquement d'un problème de contrôle, un modèle alternatif peut être envisagé. Les modèles expérimentaux sont obtenus à partir des vecteurs des données entrée-sortie en s'appuyant sur les techniques dites d'identification de systèmes. Ces techniques sont simples d'utilisation et une nouvelle identification du système peut se faire facilement dans le cas d'un changement de paramètres ou de conditions d'opération. Pour un problème de contrôle, les principaux avantages des modèles expérimentaux par rapport aux modèles analytiques sont la simplicité et rapidité d'obtention et de validation du modèle. De nombreux travaux ont été menés utilisant des techniques d'identification de systèmes pour l'obtention d'un modèle expérimental destiné au contrôle procédé. Des exemples concernant différents domaine d'application de ces techniques sont décrits, par exemple, dans [20] [72] [73].

Nous proposons d'identifier expérimentalement le procédé de projection laser à partir de mesures directes des entrées/sorties du procédé. D'abord, dans la deuxième partie de ce chapitre, nous abordons la modélisation du procédé de projection laser en insistant sur les modèles pour le contrôle procédé. Ensuite nous discutons plus amplement de notre approche dans la troisième partie par rapport à l'état de l'art relatif à l'identification des procédés de projection laser. Nous étudions les caractéristiques du procédé de projection laser en boucle ouverte dans la quatrième partie. Finalement, dans la cinquième partie, nous décrivons les essais expérimentaux qui ont été mis en œuvre afin de collecter des données entrées-sorties et nous détaillons le processus complet d'identification du procédé de projection laser jusqu'à à la validation.

[52] Les variables varient seulement en fonction du temps.
[53] Les variables varient aussi bien en fonction du temps que de l'espace.
[54] C'est particulièrement le cas pour les constantes thermo physiques variant avec la température dont les valeurs ne peuvent pas être bien précisées de manière théorique.

III.2 Les modèles pour le contrôle procédé – Etat de l'art

Le contrôle du procédé de projection laser nécessite le contrôle des paramètres impliqués lors de la construction de la pièce. De ce fait, une bonne connaissance des conditions de fabrication, du comportement thermique ainsi que des différents couplages entre ces phénomènes est requise afin de pouvoir modéliser et contrôler ce type de procédé. Globalement, *il existe deux principales approches pour la modélisation des procédés de projection laser :*

- La première repose sur une compréhension précise des corrélations existantes entre les paramètres procédés et s'intéresse à des phénomènes locaux, par exemple le *modèle phénoménologique* issu de l'étude PROFIL [2] concernant l'influence des paramètres d'entrées sur la forme géométrique du cordon, sur l'aspect métallurgique et sur le rendement matière (voir chapitre I). Généralement, les modèles issus de cette approche sont statiques[55]. Ils sont plus nombreux dans la littérature que les modèles dynamiques [13]. Ces modèles sont impropres à la synthèse d'une loi de commande car ils sont en régime stationnaire. Leur objectif est principalement le choix et l'optimisation des différents paramètres procédés.
- La seconde approche quant à elle, repose sur une compréhension plus globale du procédé, permettant une description simplifiée de l'ensemble du procédé. Cette modélisation permet de calculer à chaque instant les sorties en fonction de l'histoire des entrées et de l'histoire des sorties du procédé. Les modèles élaborés à partir de cette approche, sont des *modèles dynamiques* (équations différentielles ou des équations aux différences récurrentes). Ces modèles jouent un rôle central en automatique. C'est en effet sur la base de la connaissance de l'évolution au cours du temps du procédé (représentation en régime transitoire) que s'effectue toute la conception, l'analyse et la mise en œuvre des méthodes de commande et de surveillance.

Dans ce qui va suivre, on s'intéressera plus particulièrement aux travaux menés sur les modèles dynamiques utilisés dans la littérature pour le contrôle/commande du procédé de projection laser. Différentes approches de modélisation sont présentées et commentées (approches analytique et expérimentale).

III.2.1 Modèles de connaissance

Dans le cadre des procédés de projection laser, la manière la plus courante de déterminer les modèles qui permettent de caractériser la dynamique du procédé est de *rassembler les connaissances dont on dispose sur le comportement du processus, à partir d'expériences et/ou d'une analyse théorique des phénomènes physiques mis en jeu*.

Lors de la construction d'une pièce par projection laser, le faisceau laser se déplace à une vitesse V par rapport au substrat et interagit avec le matériau (substrat ou mur en construction) et/ou avec les particules du faisceau de poudre. Une partie du faisceau incident est réfléchie, l'autre est absorbée. De façon générale, *l'interaction laser-matière* va entrainer l'apparition de deux zones distinctes (Figure III.1) :

1. la zone fondue ou *bain liquide*, composée du mélange de matière ;
2. *la zone affectée thermiquement* (Heat Affected Zone), due à la diffusion de la chaleur dans le matériau de base.

Dans la pièce, la chaleur se propage par conduction dans le substrat à l'état solide, et par conduction et convection dans le bain liquide. A la surface de la pièce, les échanges produisent des pertes par rayonnement et par convection avec le gaz de protection ou avec l'air ambiant. Les changements

[55] Le modèle est statique si la sortie à l'instant t ne dépend que des entrées à l'instant t (équations algébriques indépendant du temps), il est dynamique si la sortie dépend aussi des entrées et/ou sorties antérieures.

dans le bain dus au passage à l'état liquide vont produire, après un refroidissement rapide, un cordon de matière solide (Solidified Clad) [13].

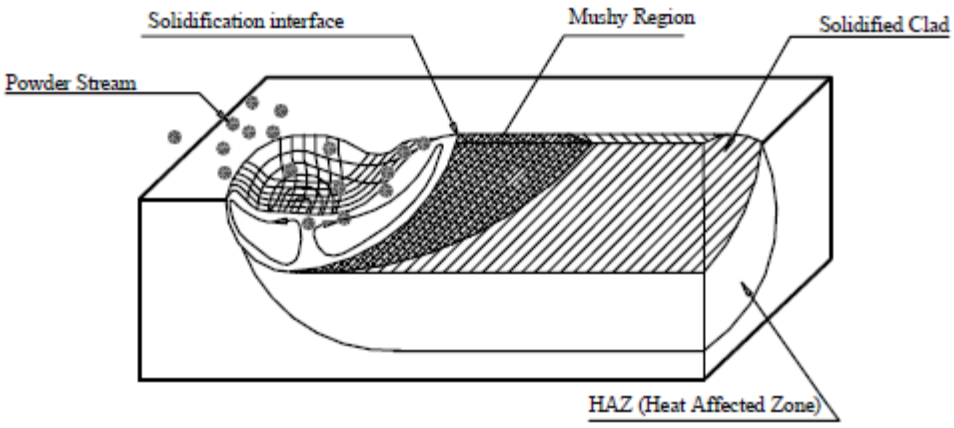


Figure III.1 – Morphologie du bain liquide [13]

La fabrication de pièce par le procédé de projection laser met donc en jeu plusieurs disciplines : la physique pour l'interaction laser-matière, la thermique pour les transferts de masse et de chaleur, la mécanique des fluides pour les mouvements du bain liquide et la métallurgie pour l'analyse de la structure. La Figure III.2 illustre les principaux phénomènes physiques intervenant dans le procédé de projection laser.

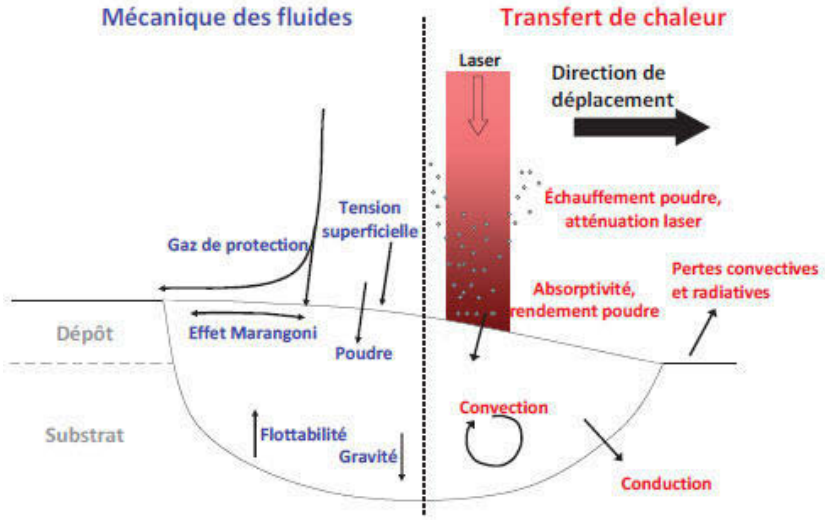


Figure III.2 – Les principaux phénomènes physiques intervenant dans le procédé de projection laser [7]

Ces connaissances conduisent à faire plusieurs hypothèses de modèles. On aboutit alors à un système d'équation aux dérivées partielles (*EDP*). Il ne fait pas de doute que ce modèle est non linéaire. Il est d'usage d'utiliser une méthode de discrétisation de type Runge-Kutta pour la résolution des différentes EDP en régime stationnaire et dynamique. La résolution des différentes EDP nécessite la connaissance des conditions initiales et les conditions aux limites. De ce fait, les différentes variables du procédé sont décrites en régime dynamique, contrairement aux modèles statiques cités précédemment. C'est une approche de modélisation où les paramètres qui interviennent dans les équations du modèle sont connus et leurs valeurs ont un sens physique. On parle dans ce cas de *modèle de connaissance ou modèle analytique*.

L*a modélisation complète du procédé de projection laser reste un champ de recherche complexe qui fait intervenir plusieurs phénomènes physiques : thermique, mécanique des fluides, métallurgie,…etc.*

Ces modèles sont très appropriés pour des objectifs de simulation numérique en éléments finis, dans le but d'affiner la compréhension des phénomènes physiques mise en jeu et des interactions entre les variables[56]. Parmi ces modèles, on peut citer en exemple, le modèle thermohydraulique développé dans COMSOL Multiphysics par [7] dont l'objectif est de parvenir à mieux comprendre les mécanismes à l'origine de la formation des ménisques latéraux pour en déterminer les paramètres qui permettront d'améliorer l'état de surface final des pièces obtenues en projection laser. On peut citer également le modèle thermomécanique du procédé DMD initié par Arnaud Longuet dans le cadre du projet PROFIL [17]. Ce modèle a été introduit dans le logiciel ZéBulon qui est un code de calcul éléments finis co-développé par le Centre des Matériaux, l'ONERA et Northwest Numerics. Il permet de modéliser la thermique, la métallurgie et la mécanique dans le cadre d'un calcul couplé. Les modèles les plus récents [74] [75] tiennent compte en plus des calculs thermiques, des calculs des contraintes et des déformations dans la pièce lors de sa construction. Néanmoins pour être pertinents, ces modèles doivent être corrélés à des mesures effectuées en temps réel sur le procédé. En effet, la mesure des contraintes et déformations pendant et après expérimentation est source de nombreux défis, de coûts non négligeables et restreinte à des essais destructifs

Une caractéristique du procédé de projection laser, comparativement à d'autres procédés, est dans *la faiblesse des modèles disponibles et les problèmes associés à la transformation des modèles de connaissance en modèles adaptés au contrôle/commande*. En effet, d'après la recherche bibliographique menée, nous avons constaté que peu de modèles, appliqués à la problématique du contrôle procédé ont été étudiés suffisamment à fond pour que des modèles valides ne soient disponibles. On peut trouver plusieurs raisons à cet état de fait :

- Certains paramètres qui composent les modèles ne sont pas toujours connus avec précision. Ils sont souvent fixés au cas par cas de telle sorte que le comportement du modèle se rapproche du procédé réel. On peut citer, en particulier, les constantes thermo physiques des matériaux en phase solide et en phase liquide dont les valeurs ne peuvent pas être bien précisées de manière théorique et ne sont généralement pas facilement accessibles, et doivent ainsi être identifiées ou connues sur de très larges intervalles de température ;
- Le couplage complet des variables représente encore à l'heure actuelle un réel défi pour les modélisateurs ;
- La modélisation des conditions aux limites (thermiques, hydrodynamiques et mécaniques) est encore imparfaite ;
- Les temps de calcul sont très longs, de par les caractères multi-physique et instationnaire.

Ces limitations font que les applications de ces modèles à des configurations industrielles dont la géométrie des pièces est toujours plus complexe sont encore trop rares. Un effort important est ainsi fait pour substituer ces modèles par des modèles plus adaptés à la commande de procédé (Cf. III.2.2).

III.2.2Modèles expérimentaux

Dans la pratique, il est toujours souhaitable d'établir un modèle de connaissance des processus que l'on étudie. Néanmoins, comme nous l'avons indiqué plus haut (Cf. § III.3.1), *vu la complexité de ces modèles et l'immense temps de calcul requis, les modèles de connaissance ne peuvent être qu'approchés et ne peuvent pas être utilisés directement dans un contexte de commande en temps réel.*

D'autres approches de modélisation existent et plusieurs pistes de recherche ont été explorées pour *substituer ces modèles de connaissance par des modèles purement empiriques, moins coûteux et plus adaptés à la commande de procédé*. *Ces modèles, sont construits essentiellement sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du procédé à modéliser*. La modélisation, consiste alors à utiliser, pour représenter les relations entre les grandeurs mesurées et les paramètres de

[56] Généralement, les modèles issus de cette approche sont bi ou tridimensionnels.

fonctionnement, des structures mathématiques (algébriques, différentielles, ou récurrentes) paramétrées, et à estimer les paramètres[57], à partir des mesures disponibles, de manière à obtenir la meilleure précision avec le plus petit nombre possible de paramètres ajustables [72]. En conséquence, de nombreux auteurs utilisent ce genre d'approche pour identifier un modèle dynamique pour les procédés laser.

[41] [76] ont étudié l'effet du changement des conditions opératoires sur la température et la surface du bain liquide. Pour cela, ils font varier la vitesse de déplacement et la puissance qui sont considérées comme des paramètres d'entrée du modèle. Les réponses transitoires observées indiquent que le modèle se comporte comme un système du premier ordre. Dans une autre étude, [49] a utilisé ce principe pour modéliser le comportement dynamique de la profondeur et de la surface du bain pour un procédé de traitement de surface en phase liquide. Un stimulus a été appliqué sur des entrées de commande (puissance ou vitesse) du système Les études expérimentales menées montrent que le procédé a un comportement d'un système du second ordre avec retard. Bataille [77] identifie le système de trempe laser par des signaux de type pseudo aléatoire. La structure mathématique du modèle est une équation de récurrence. [78] utilise également l'identification de type ARMA dans le marquage laser pour identifier le modèle reliant la largeur du bain à la puissance et la vitesse. [79] ont utilisé la structure Hammerstein-Wiener pour identifier le procédé. Le modèle comprend une partie linéaire et un bloc non linéaire dont les paramètres ont été identifiés par les mesures expérimentales des entrées/sorties du procédé qui sont la vitesse et la hauteur du bain.

Bien que la modélisation d'un procédé par une fonction de transfert rende compte de façon satisfaisante de son comportement dynamique, elle ne le fait qu'autour d'un point de fonctionnement donné, et elle ne peut pas être utilisée pour d'autres points de fonctionnement. Il est donc nécessaire de disposer d'un jeu de plusieurs fonctions de transfert pour représenter complètement le comportement du système.

La tendance actuelle au niveau de la modélisation des systèmes dynamiques complexes est de générer des modèles qui s'adaptent en ligne pour mieux satisfaire les besoins de l'application, qui s'expriment en termes de performance, de qualité de système de supervision ou de synthèse de lois de commandes. Cette discipline (relevant du domaine de l'intelligence artificielle) a eu un impact limité, jusqu'à une date récente, sur les applications industrielles, parce qu'elle a mis l'accent, de façon pratiquement exclusive, sur le traitement symbolique de la connaissance, par opposition à la modélisation numérique utilisée traditionnellement dans les sciences de l'ingénieur [72]. Plus récemment, on a assisté à un retour du numérique dans ces problèmes d'intelligence artificielle, avec *les réseaux de neurones artificiels et la logique floue* [80]. Alors que les réseaux de neurones proposent une approche implicite de type boîte noire de la représentation des connaissances, la logique floue est plus proche de l'intelligence artificielle symbolique, qui met en avant la notion de raisonnement, où les connaissances sont codées explicitement. Néanmoins, la logique floue permet de faire le lien entre la modélisation numérique et la modélisation symbolique. Le comportement du système se matérialise par une représentation à base de règles du type « Si-Alors » qui apportent une description linguistique à la fois transparente et interprétable pour l'utilisateur du modèle. Cette représentation peut être construite en intégrant dans la modélisation la connaissance a priori sur le système à identifier (connaissance de l'expert sous la forme de règles, choix d'entrées/sous-modèles, descriptions de régions de validité,…) et d'autre part, plus récemment, d'incorporer des données entrée-sortie ce qui correspond à une construction plus systématique du modèle.

Dans les applications de la théorie des ensembles flous aux procédés laser, l'approche floue est vue comme une méthode de modélisation linguistique de l'expertise des opérateurs qui joue un rôle important dans la commande. Ainsi, [81] considèrent la modélisation d'un contrôleur flou appliqué sur des procédés de traitement de surface et [82] dans le cas de la trempe laser. D'autres approches

[57] Dans cette thèse, nous désignerons fréquemment l'estimation des paramètres sous le terme d'identification.

plus récentes concernant la modélisation floue des procédés laser à partir de données se sont développées au cours des dernières années. Ces approches se sont focalisées sur les comportements entrée-sortie du système, en particulier sous la forme de modèle flou de type Takagi-Sugeno . On peut citer à titre d'exemple quelques applications : [83] et [84] proposent l'utilisation des techniques de clustering flou, à partir des données entrée-sortie, pour l'identification d'un modèle dynamique TS de type NARX qui représente le comportement non-linéaire du procédé de rechargement laser.

D'autre part on peut citer aussi l'application des techniques neurofloues qui visent à intégrer les capacités d'apprentissage à partir des données que distinguent les réseaux de neurones artificiels avec la capacité de description linguistique du comportement qui caractérisent les modèles flous. Comme exemple, [85] présentent le développement d'un modèle neuroflou pour la prédiction de la hauteur du bain en fonction de la puissance et la vitesse dans le cas du rechargement laser. On trouve aussi dans [13] un modèle neuronal pour la prédiction de la hauteur et de la vitesse de solidification du bain en fonction de la puissance et de la vitesse. Dans le même ordre d'idée, [86] proposent l'obtention d'un modèle neuroflou et un modèle neuronale [87] de simulation des procédés de traitement de surface. Le modèle proposé a été utilisé pour la prédiction de la température du procédé aux variations de puissance. [88] a développer un modèle pour le procédé de soudage par arc au gaz tungstène (GTAW : Gas Tungsten Arc Welding), à base de réseaux de neurones capable de prédire la géométrie du dépôt (largeur, hauteur, dilution, profondeur) avec une très bonne précision.

III.3 Synthèse et démarche retenue

Comme nous l'avons vu précédemment, la modélisation du procédé de projection laser fait largement appel aux modèles de connaissance pour décrire les phénomènes physiques mis en jeu lors du processus d'élaboration de pièce. Il a été montré que le procédé est intrinsèquement non linéaire, multivariable, couplé et non stationnaire. Si ces modèles de connaissance sont en mesure de décrire correctement les comportements non linéaires du système, ils peuvent néanmoins s'avérer, en fonction de leurs complexités mathématiques, difficiles à obtenir et/ou à manipuler dans un contexte de synthèse d'une loi de commande.

L'objectif final de ce travail est de synthétiser une loi de commande permettant de contrôler la qualité de la pièce via le contrôle de la géométrie du bain liquide. Pour atteindre cet objectif, *il convient donc de chercher un modèle de commande représentatif du modèle complet non linéaire au voisinage de la plage de fonctionnement considérée*. La méthode d'identification basée sur l'approche *multi modèles de type ARX* a été choisie pour l'obtention des modèles en boucle ouverte pour le procédé de projection laser pour les raisons suivantes :

1. Les multi-modèles de type ARX offrent une alternative intéressante pour contourner ces difficultés, car ils permettent de modéliser le système dont le comportement est non linéaire et non stationnaire et de prendre en compte la présence de plusieurs modes de fonctionnement [89] [90].
2. Notre étude préalable du procédé de projection laser en boucle ouverte, a montré que les meilleurs modèles construits à partir de mesures d'entrées-sorties au sens du critère RMSE sont ceux d'un système du premier ordre (CF. §III.4) ;
3. En se basant sur les modèle de connaissance présentés dans l'état de l'art, [76] ont donné quelques hypothèses suivant lesquelles l'approximation de la fonction non linéaire multivariable des équations de la chaleur peut être réalisée avec une précision arbitraire d'une fonction linéaire du premier ordre autour d'un point d'un fonctionnement (un domaine plus ou moins restreint);
4. Comme suggéré dans [89], un modèle local peut être défini comme les p premièrs termes du développement en série de Taylor (le modèle linéarisé tangent) du vrai modèle (inconnu) autour d'un point de la zone de validité du modèle local ;

5. Les modèles locaux affines sont les plus utilisés grâce à leur compromis entre une bonne capacité d'approximation et une complexité réduite du modèle pour une implémentation temps réel dans un schéma de système de commande [91].
6. La méthode peut être naturellement étendue au cas de systèmes multi variables [92].

Nous proposons dans cette thèse une procédure d'identification hors ligne du procédé de projection laser par une approche multi-modèle qui est une approche beaucoup plus complète. Ce modèle est donc très approprié pour la synthèse d'une loi de commande.

Présentation de l'approche multi-modèle

L'approche multi modèles doit sa popularité à la simplicité de représentation des systèmes non linéaires par décomposition du comportement dynamique du système en plusieurs zones de fonctionnement. Chaque zone étant caractérisée par un modèle local de structure simple, en général linéaire ou affine. Chaque modèle local tente alors de représenter le système dans un domaine de fonctionnement bien défini (autour des points de fonctionnements) [90] [1]. Il sera facile ensuite pour chaque modèle local de déterminer un contrôleur adapté et lors du contrôle/commande on affectera au système un de ces contrôleurs en fonction de la valeur de la commande (Voir chapitre IV).

Avec une représentation multi-modèle, le modèle général d'un système dynamique non linéaire peut se mettre sous la forme [89] :

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{M} \omega_i(\xi(k), \beta_i) \cdot f_i(\varphi(k), \cdot\, \theta_i) \qquad \text{(III.1)}$$

Où :

M est le nombre de modèles locaux ;

ω_i est le degré d'activation du modèle local $f_i(\cdot)$,

$\xi(k)$ est un vecteur contenant les variables d'indexation qui déterminent l'appartenance de l'observation $\varphi(k)$ à une zone de fonctionnement. Les variables d'indexation peuvent être les entrées du système, les entrées et la sortie du système, ou les composantes du vecteur de régression ;

β_i est un vecteur de paramètres caractérisant la zone de validité du modèle local $f_i(\cdot)$,

$\theta_i$est un vecteur de paramètres caractérisant le modèle local $f_i(\cdot)$,

De façon pratique, les paramètres du modèle local correspondant aux différents points de fonctionnement sont obtenus par identification ou par linéarisation (dans ce cas on suppose disposer d'un modèle mathématique non linéaire). Il a été montré [90] que les multi modèles constituent un outil d'approximation universel. En effet, n'importe quel système non linéaire peut être approximé avec une précision imposée en augmentant le nombre de sous-modèles et en optimisant les fonctions de pondération. Les outils d'analyse des systèmes linéaires peuvent d'autre part être utilisés, si les sous-modèles sont de type linéaire et pour des fonctions de pondération particulières.

III.4 Etudes du procédé en boucle ouverte

Dans le Chapitre I, nous avons décrit les paramètres impliqués dans le procédé de projection laser et à travers les travaux de [5] nous avons mis en évidence, l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques géométriques, métallurgiques du cordon et du mur (Etude statique du cordon : Chapitre I, §I.3).

Pour concevoir un système de commande, les caractéristiques dynamiques du procédé de projection laser doivent être analysées, et la corrélation entre la géométrie du bain et les paramètres d'entrée doit être établie. C'est ce que nous proposons de faire dans cette étude.

Les entrées du système sont la puissance, la vitesse de déplacement et le débit de poudre. Seules la vitesse et la puissance peuvent être modifiées rapidement durant le tir. Les dimensions du bain ont donc été étudiées en fonction de la puissance et la vitesse de déplacement. Les résultats que nous présentons sont obtenus sur des formes géométriques simples, c'est-à-dire des cordons de plusieurs couches. Les mesures du bain ont été réalisées sur le dernier cordon du mur.

Des échelons en puissance (ou en vitesse) d'amplitude variable sont ensuite utilisés comme entrée pour calculer la réponse en boucle ouverte du procédé (réponse indicielle). Différentes fonctions de transfert[58] du premier, second et troisième ordre entre les dimensions du bain liquide caractérisé par la largeur et la hauteur ont été testées. *L'analyse des résultats montre que la fonction de transfert du premier ordre (équation (III.9)) est celle qui décrit le mieux la dynamique dominante (comportement transitoire) du procédé dans tous les cas (Figure III.3). Ces résultats sont également en accord avec ceux présentés dans l'état de l'art* [41] *dans la modélisation physique du procédé de traitement de surface d'alliage en TA6V.*

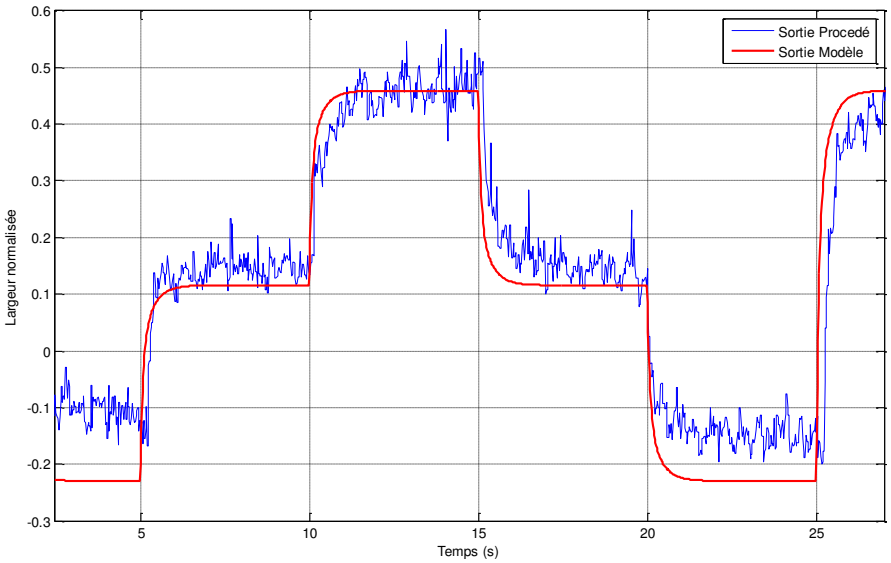


Figure III.3 – Réponse indicielle du procédé de projection laser

Le gain statique, c'est à dire le rapport nominal entre la puissance laser et la largeur du bain, a été étudié pour deux vitesses de déplacement (400 et 800 mm/min) à l'aide d'un signal rampe appliqué à l'entrée du laser. La source laser que nous avons utilisée, ne pouvait pas délivrer des puissances en sortie inférieur à 100W. Cependant, nous notons qu'une puissance minimum autour de 260W est nécessaire pour la formation du bain liquide (ce seuil varie selon la vitesse de déplacement) (Figure III.4).

[58] La fonction de transfert permet de modéliser d'une manière empirique le comportement dynamique du procédé par des relations simples entre les grandeurs mesurées et les paramètres procédé.

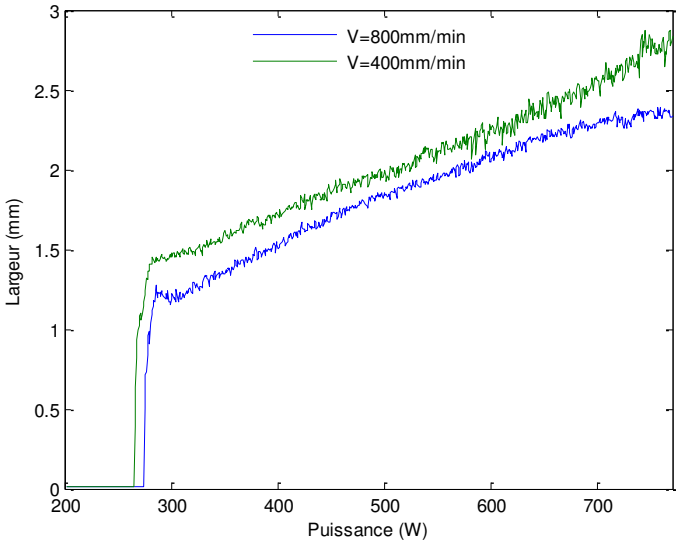


Figure III.4 – Evolution de la largeur du bain à un signal rampe

Cette figure montre qu'à partir d'un certain seuil, la commande par la puissance du laser de la largeur du bain obéit à une loi linéaire jusqu'à la saturation à environ 2.7mm. Par contre, la commande par la vitesse n'est pas linéaire.

Le tableau suivant donne *les paramètres combinés optimal* et coefficient de corrélation associé aux dimensions du bain. Ces valeurs proches de l'unité montre une bonne corrélation entre les dimensions du bain et la combinaison des paramètres d'entrées (la puissance laser (P), la vitesse d'avance (V) et *le débit massique de poudre* (Dm)*)*. Ces résultats sont en accord avec ceux de [5] [93] et les travaux de simulation de [7]. *Il a été mis en évidence que la largeur varie en fonction de* $P/\sqrt{V}$ *et la hauteur en fonction de* Dm/V

Sorties	Paramètre combiné optimal		[5]		[93]	
Largeur	$P/\sqrt{V}$	R=0.9038	$P/\sqrt{V}$	R=0.96	$P/\sqrt{V}$	R=0.95
Hauteur	Dm/V	R=0.7935	Dm/V	R=0.88	Dm/V	R=0.97

Tableau III.1 – Paramètre combiné optimal et coefficient de corrélation pour les paramètres de sortie

L'étude statique de la largeur montre que le couple puissance et vitesse de déplacement de la pièce commande la largeur. La largeur varie linéairement en fonction de la puissance. La commande par la vitesse est plus délicate à mettre en œuvre car le système n'est plus linéaire, la largeur étant sensiblement proportionnelle à $1/\sqrt{V}$ et la hauteur à $1/V$. *En linéarisant autour des conditions de travail, la vitesse et la puissance du laser peuvent être utilisé comme des commandes de processus*.

Le procédé comporte un problème de propagation de la chaleur. Un phénomène du type thermique est dispersif. Le système perdant de l'énergie tend toujours vers un équilibre et il ne peut donc pas être divergeant. La sortie est toujours limitée. En effet, suite à la construction de murs de paramètre P400V400Dm1 de 20 couches, les mesures de hauteur et largeur ont montré que les dimensions des couches se stabilisent et tendent vers un état d'équilibre à partir de la quatrième couche environ[59] (Figure III.5). *Les premières couches sont trempées* du fait du fort pouvoir dissipateur de calories du substrat et donc *possèdent des caractéristiques géométriques particulières*. Pour les couches

[59] Dans notre cas, la stabilisation s'établit assez bien à partir de la quatrième couche, mais que l'effet de pompage se fait ressentir jusqu'à la dixième couche.

supérieures, l'éloignement du substrat conduit à une diminution de l'évacuation des calories et donc à l'échauffement du mur. Ceci entraîne une augmentation du volume du bain liquide qui conduit à l'affaissement de la couche et se traduit par une diminution de sa hauteur et une augmentation de son épaisseur.

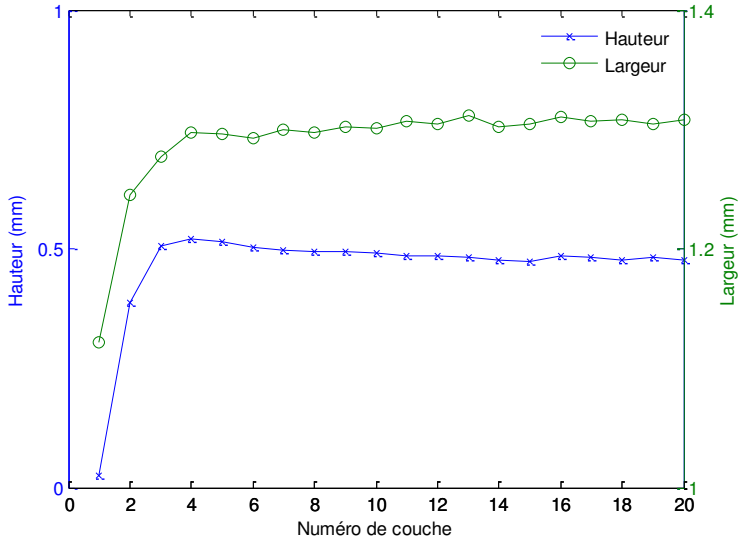


Figure III.5 – Dimensions du bain liquide en fonction du nombre de couches

III.5 Modèles du procédé de projection laser, identification et résultats

L'identification de systèmes est la spécialité visant à modéliser les systèmes à partir de données expérimentales. Un historique de cette discipline peut être trouvé par exemple dans [20] [94]. Contrairement à la modélisation mathématique, l'identification de systèmes est une approche expérimentale, lors de laquelle un modèle issu de connaissances a priori est optimisé à partir des données mesurées afin d'approcher le plus fidèlement possible le comportement du système.

La Figure III.6 représente le processus complet d'identification du procédé de projection laser en boucle ouverte. Elle est inspirée de [95] qui décrivent les principales problématiques liées à l'identification en robotique aérienne concernant chacune des étapes de la Figure III.6. *Ce diagramme est également connu sous le nom de la méthode des 4-M,* qui désignent les quatre étapes charnières du processus d'identification. La construction du modèle consiste à formaliser les connaissances disponibles a priori, à recueillir des données expérimentales, puis à estimer la structure, les paramètres et les incertitudes d'un modèle, enfin à valider (ou invalider).

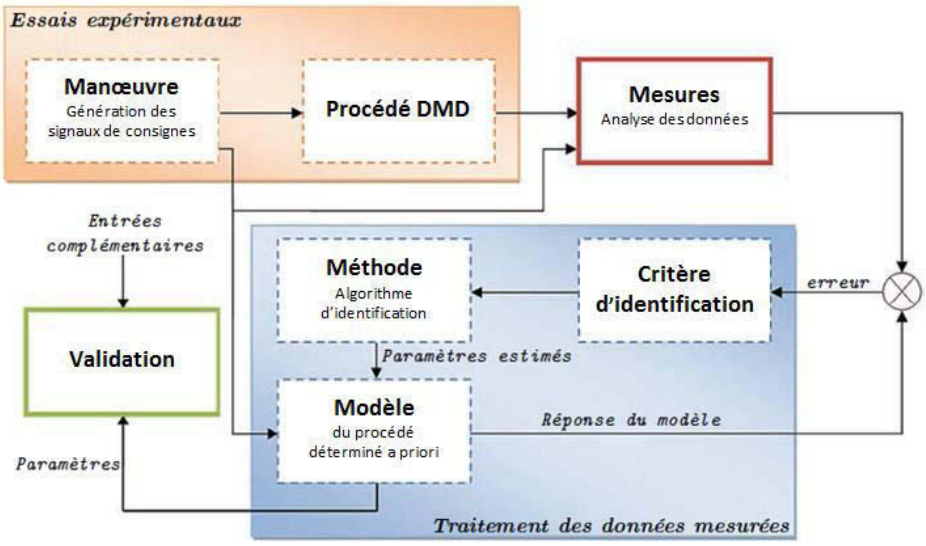


Figure III.6 – Synoptique du processus d'identification du procédé de projection laser

Nous allons dans ce qui suit décrire ces étapes jusqu'à la validation du modèle identifié. Ces modèles permettront, dans le prochain chapitre, la synthèse des contrôleurs, leur validation en simulation et sur la machine LIMOGE, ainsi que la vérification des propriétés de robustesse en boucle fermée à des variations dans les conditions opératoires.

Notons que les différentes étapes de la méthodologie complète de l'identification ont été développées à partir des fonctions de la boite à outils du logiciel MATLAB appelée *System Identification Toolbox* et développée par L.Ljung [96]. Cette toolbox rassemble la plupart des méthodes déjà proposées et développées dans la littérature pour identifier des modèles de type boîte noire décrits sous forme de fonction de transfert ou sous forme d'état, pour les systèmes mono- et multi-variables. Elle possède également une interface graphique qui facilite l'application de la procédure complète d'identification. Dans la fenêtre principale, les options d'identification (choix des vecteurs d'entrée/sortie et leurs prétraitements) sont proposées sous forme de menus contextuels. Les choix de la structure du modèle, des paramètres de régression et de l'algorithme d'identification sont également proposés sous formes de menus contextuels. Pour une structure déterminée, l'identification est réitérée tant que le nombre maximal d'itérations ou le critère d'arrêt n'est pas atteint jusqu'à l'obtention d'un modèle satisfaisant. Les paramètres et la structure de ce modèle sont alors sauvegardés et ses capacités de robustesse et de généralisation sont vérifiées à partir d'autres données représentatives du fonctionnement du procédé (validation croisée)

III.5.1 Chaine d'acquisition et de génération de signaux

La conception expérimentale est une étape qui requiert beaucoup de temps et une attention particulière, depuis le choix d'un système de vision, jusqu'à l'élaboration d'une chaîne complète d'acquisition et de traitement des données, tant aux niveaux matériels que logiciels (Cf. Chapitre II).

Nous voulons à présent *décrire le processus expérimental qui a été mis en œuvre pour identifier le modèle du procédé de projection laser*. Durant cette phase, *des mesures sont effectuées sur les variables sensées caractériser le procédé. Ces variables sont les variables externes qui agissent sur le procédé (entrées de commande : Puissance et Vitesse), et la réponse du système (variables de sortie : dimensions du bain liquide)*. Il existe souvent des perturbations non mesurables qui agissent sur le procédé (en entrée ou en sortie) rendant plus difficile sa modélisation. Il convient donc d'appliquer un traitement à ces informations et veiller à ce qu'elles en soient débarrassées et cohérentes avec les entrées de commande.

III.5.1.1 Choix des points de fonctionnement

Le choix des points de fonctionnement est à définir en fonction d'un certaines nombre de critères. Ces critères sont relatifs aux caractéristiques géométriques (dimensionnelles et topographiques), métallurgiques et mécaniques ainsi qu'aux critères économiques du procédé [5].

La Figure III.7 et la Figure III.8 montrent la zone de fonctionnement qu'on a utilisée pour l'identification des multi modèles du procédé de projection laser. Cette zone correspond à une fenêtre paramétrique dans l'espace (Puissance-Vitesse) de la cartographie du TA6V pour laquelle le procédé possède les caractéristiques désirées en termes de rendement massique et en stabilité de construction (Voir chapitre I). Les deux points expérimentaux, qui sont placés dans la zone de fonctionnement sont ceux utilisés par Maisonneuve pour valider les tendances observées et qui nous servent aussi de références dans nos calculs.

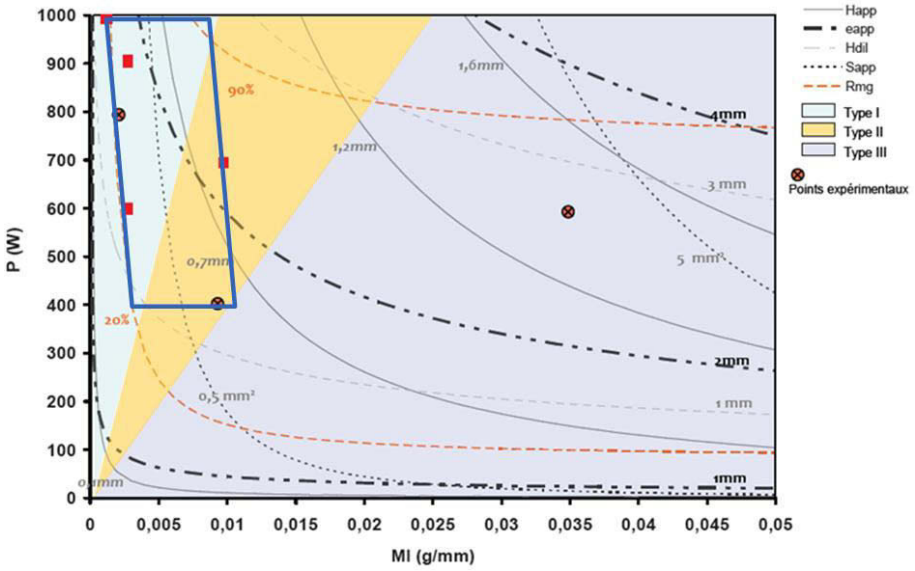


Figure III.7 – Cartographie du procédé de projection laser traduisant l'influence des paramètres P, V, Dm (Ml=Dm/V) sur les caractéristiques géométriques du cordon (Happ, eapp, Sapp, HDIL), le rendement massique géométrique Rmg et la typologie du cordon en TA6V.

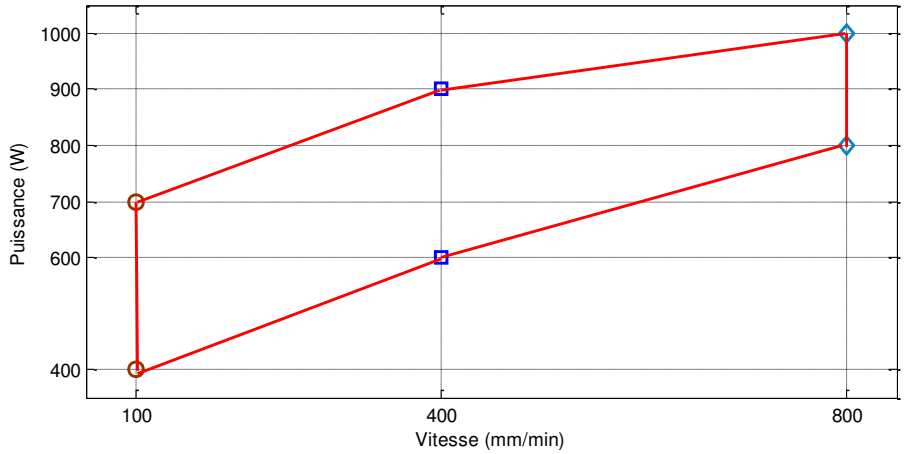


Figure III.8 – Zone de fonctionnement du procédé

III.5.1.2 Description des actionneurs

L'identification de la réponse des actionneurs (*dispositif laser et moteurs de table de déplacement*) a été effectuée en considérant qu'il s'agissait d'une boite noire dont l'entrée est une commande en tension comprise entre 0 et 5V et dont la sortie est une puissance (dans le cas du dispositif laser) ou

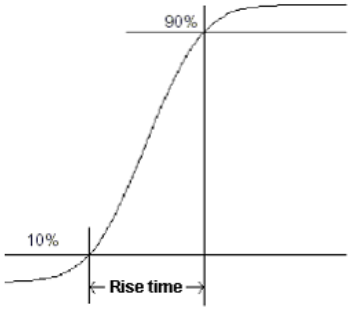
une vitesse (dans le cas de la table de déplacement). Différents points de fonctionnement et amplitudes d'échelons ont été utilisés durant les tests des actionneurs. Les données expérimentales d'entrées/sorties récoltées ont permis d'identifier les valeurs des constantes de temps des deux actionneurs utilisés.

Le temps de réponse du moteur et du dispositif laser est satisfaisant. Pour remarque, si la dynamique du dispositif laser est suffisamment rapide comparé à celle des moteurs, dans la pratique, il est possible de s'en passer dans l'identification du modèle pour la synthèse du contrôleur puisque la bande passante du procédé de projection laser sera bien inférieure à celle des actionneurs.

III.5.1.3 Choix de la fréquence d'échantillonnage

Le choix de la fréquence d'échantillonnage pour l'identification et la commande de procédé repose sur des considérations pratiques. Bien qu'il soit possible de la calculer pour des problèmes simples, il n'est pas possible de le faire dans des situations concrètes en raison de la complexité du problème ou l'absence du modèle du procédé. La référence [91] mentionne plusieurs règles de calcul de la période d'échantillonnage en fonction de la plus petite constante de temps, la bande passante ou le temps de monté du signal (Rise time).

En règle générale, la formule suivante[60] permet de calculer la bande passante du signal à partir de son temps de montée (*défini comme le temps nécessaire pour passer de 10% à 90% de la valeur maximal du signal*) :



$$Temps\ de\ montée = \frac{0.35}{Bande\ Passante}$$

Figure III.9 – Temps de montée du procédé

Nous avons évalué le temps de montée du procédé à partir de l'observation de la montée de la largeur du bain à un échelon en puissance. L'augmentation de la largeur du bain qui en résulte représente la réponse indicielle du système. La recherche d'une valeur maximale de la largeur (Lmax) et du temps nécessaire pour passer de 10% à 90% de Lmax nous a conduit à évaluer le temps de montée à environ 0.0667s ce qui correspond à une bande passante de 5.25Hz.

Idéalement, *il faudrait utiliser une fréquence d'échantillonnage 10 fois supérieure à la bande passante du signal calculée à l'aide de la formule précédente*[61] [91]. Avec une fréquence d'échantillonnage de 75 Hz des résultats satisfaisants ont été obtenus et c'est cette fréquence de 75 Hz qui a été retenue pour le reste de l'étude.

III.5.1.4 Choix de l'entrée d'excitation

L'approche boite noire de l'identification utilise un ensemble de données entrées-sorties pour le calcul des paramètres du modèle. Plus cet ensemble est riche plus la pertinence du modèle obtenu est élevée. Il est alors important *de bien choisir l'entrée d'excitation*. Toutefois, il faut rappeler que l'obtention d'un jeu de données assez général pour l'identification n'est pas évident et *il n'y a malheureusement pas de signal universel* [91]. En effet, les signaux générés à l'entrée du système à

[60] Voir http://www.ni.com/white-paper/4333/fr/

[61] En d'autres termes, le temps de montée du numériseur (carte d'acquisition) devrait représenter 1/10 du temps de montée du signal pour acquérir ce dernier avec un taux d'erreur minimal.

identifier doivent être suffisamment riches en termes fréquentiels de manière à exciter toute la plage des fréquences dans laquelle nous souhaitons que le modèle soit valable. De plus il faut être certain, avec ce jeu de valeurs, d'atteindre les différents points de fonctionnement[62].

Différents signaux d'excitation ont été initialement essayés. Parmi eux les signaux *sinusoïdaux* utilisés pour l'analyse harmonique. Cette analyse exige la mesure de la réponse du système à des excitations en signaux sinusoïdaux pour toute la gamme des fréquences intéressantes et en différents points de fonctionnement. Une analyse de la sortie à la fréquence d'excitation permet alors de mesurer le gain et la phase du système. Un tableau des amplitudes de réponses mesurées du système aux différentes fréquences est ainsi construit. Il est ensuite possible d'ajuster une fonction de transfert à ce tableau. Cette méthode est longue à mettre en œuvre et pourrait être remplacée par des méthodes plus rapides sur des excitations en Séquences Binaires Pseudo Aléatoire (*SBPA*) ou en anglais PRBS (Pseudo Random Binary Signal)

Le temps de réponse typique du procédé de projection laser ainsi que notre expérience nous ont aidés à dimensionner les signaux appropriés à notre cas d'étude. En même temps, *afin de rester dans le domaine linéaire défini par les différents points de fonctionnemen*t, on est obligé de restreindre les variations des variables de commande (amplitude) entre 10 et 20 % de la valeur nominale. Un choix possible est un signal SBPA constitué de la concaténation de créneaux d'amplitudes et de durées aléatoires, sur les entrées de commandes (puissance, vitesse) et dont les paramètres suivants doivent être choisis [92]:

1. la période d'échantillonnage Ts
2. le nombre de registres à décalage n
3. le nombre de périodes p
4. L'amplitude

Plusieurs essais ont été réalisés pour choisir ces différents paramètres. Relevons tout de même que le nombre de registres à décalage dépend directement du système d'acquisition de données. En effet, $(2^n-1)p$ représente le nombre de points N qu'il faudra enregistrer lors de chaque expérimentation[63]. L'amplitude des deux premières secondes a été maintenue constante après le début du tir afin d'être certain que les transitoires soient terminés. Sur la Figure III.10 apparait un exemple d'un signal de commande en puissance qu'on a utilisé pour l'identification. L'axe des ordonnées représente l'amplitude variant d'une manière aléatoire autour de la valeur nominale 0.938Volts (correspondant à la puissance laser 400Watts). Dans cet exemple les paramètres choisis sont n=8, p=6, et Ts=1/75s.

[62] Une propriété importante pour les signaux d'entrée est la "richesse d'information" qu'ils peuvent transmettre au système, indiquée par la notion de persistance d'excitation (persistency of excitation) [97]

[63] La matrice de covariance d'un estimateur tend à décroître asymptotiquement au fur et à mesure que la quantité d'échantillons augmente, ce qui permet de conclure que le signal d'entrée doit être le plus long possible [97].

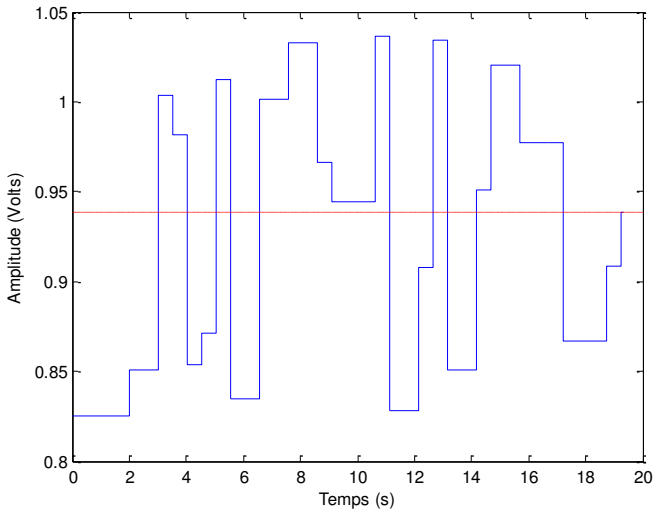


Figure III.10 – Signaux d'entrée (puissance ou vitesse) pour l'identification du procédé de projection laser.

III.5.1.5 Elaboration du jeu des données entrée-sortie

Le premier pas vers la construction du modèle du procédé de projection laser consiste à produire et acquérir un jeu de données entrée-sortie du procédé, c'est-à-dire mesurer les dimensions du bain, en fonction de nombreux points de fonctionnement (couple puissance/vitesse).

La collecte de données expérimentales a été réalisée pour le Ti6Al4V à une fréquence d'échantillonnage de 75 Hz. Les substrats sur lesquels nous avons travaillé sont des plaques en Ti6Al4V de forme parallélépipédique de 20mm d'épaisseur sur 100mm de large et 200mm de long. Les cordons ont été construits en utilisant la configuration de travail optimisée de [5] (distance de travail =3,5mm, défocalisation laser =-1,5mm, défocalisation poudre=6,5mm) avec un temps de pause de 2secondes entre chaque couche. La poudre utilisée est de granulométrie 45-75µm.

Pour chaque point de fonctionnement, on fait varier la puissance en gardant la vitesse constante et inversement. Le débit de poudre est maintenu constant.

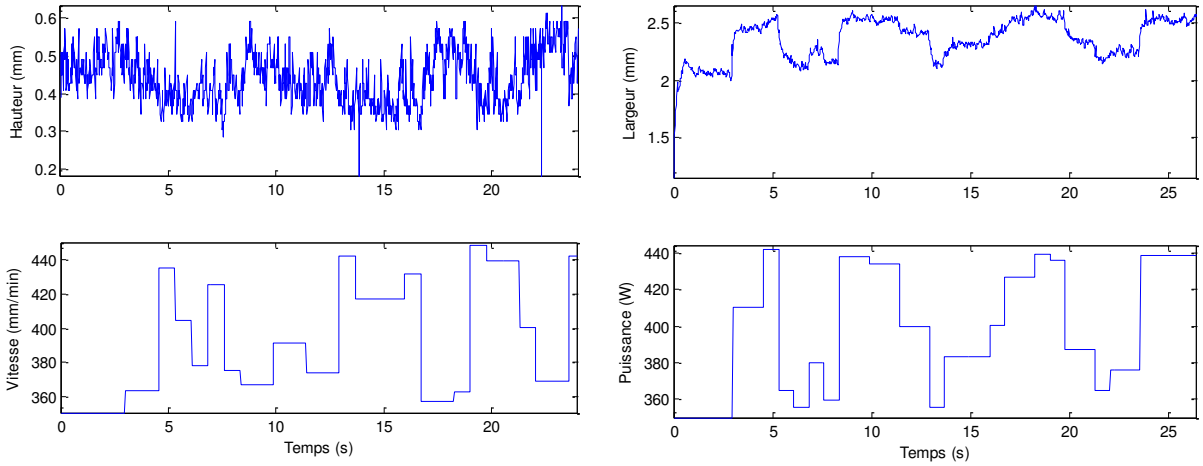
Afin de corréler les signaux d'entrées-sorties, les entrées de commande sont enregistrées de manière synchrone avec l'image vidéo du bain. L'ensemble de l'acquisition des données est supervisé par un script MATLAB (voir chapitre II).

Lors de cette étude, des murs d'une vingtaine de couches ont été construits (Figure III.11). Les dimensions du bain sont mesurées sur la dernière couche pour s'affranchir du phénomène du pompage (voir III.3) et ainsi s'assurer d'une bonne reproductibilité des dépôts.

Figure III.11 – Exemple d'un mur élaboré pour l'identification (P700V100Dm1)

A la fin de l'expérience, les films du bain liquide provenant des caméras sont traités et on récupère ensuite un jeu de données sous forme d'un fichier correspondant à l'évolution des dimensions du bain liquide soumise aux signaux d'excitation en puissance ou en vitesse. Plusieurs jeux de données entrée-sortie sont acquis. Ces jeux de données sont divisés en deux. La première moitié de ces données est utilisée pour l'identification du modèle et la seconde moitié pour la validation.

Pour clôturer cette section, nous présentons un échantillon des séquences d'entrées de commande, de la largeur et de la hauteur du bain afin d'en critiquer la qualité (Figure III.12). L'utilisation de ces mesures nécessite un *pré traitement*



(a) (b)

Figure III.12 – Données d'identification : La séquence de l'entrée de commande et celle de la sortie mesurée : Vitesse-Hauteur (a) et Puissance-Largeur (b)

Nous voulons aussi mettre en évidence les nombreux réglages mécaniques (positionnement du substrat, centrage de la buse, réglage du point focal poudre et laser, ….etc) que nécessite le procédé et qui influent directement sur la qualité des mesures. Ce qui a été aussi constaté lors de l'étude paramétrique menée dans le cadre de la thèse de [5] est que la reproductibilité du procédé n'était pas parfaite. Nous n'avons pas d'explications claires sur ce phénomène. Des fluctuations du débit massique de poudre en cours de construction du mur ont pu être néanmoins constatées. De plus, les puissances utilisées (200 à 500W) se situent dans la limite basse du domaine de fonctionnement du laser. En outre, nous avons quantifié la reproductibilité des déplacements (i.e. la vitesse de balayage) imposés par la commande numérique de la machine LIMOGES.

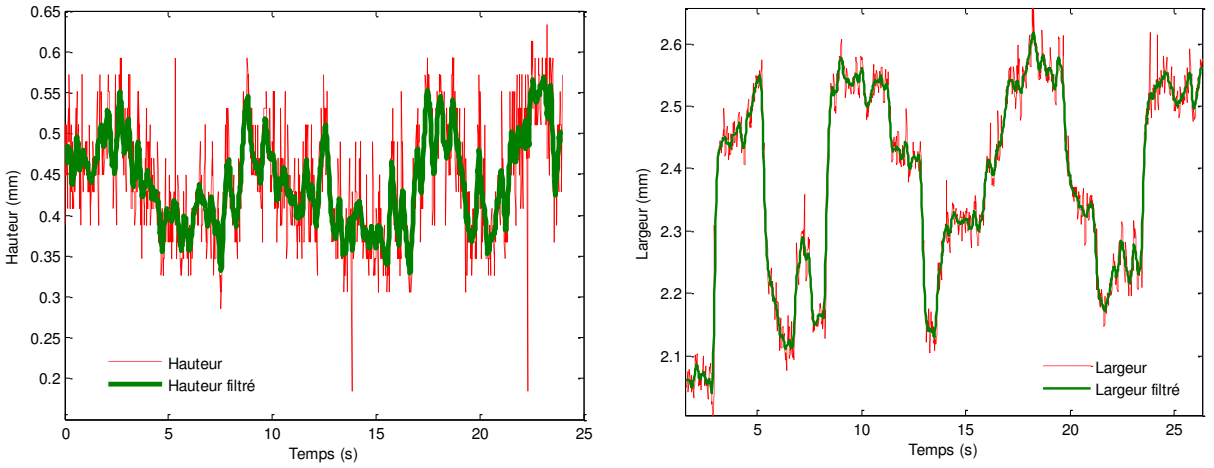
III.5.1.6 Prétraitement des données

Les difficultés d'exploitation des données expérimentales imputables aux conditions opératoires ont essentiellement deux origines : les bruits de mesure et les perturbations extérieures. Les autres proviennent de la nature même de ces informations (fluctuations du bain). Des traitements spécifiques ont été développés dans l'objectif de dépasser ces difficultés et de rendre les données consistantes et cohérentes avec les entrées de commande, de manière qu'elles soient utilisées de la manière la plus efficace possible par l'algorithme d'identification. Nous en présentons quelques-unes dont le choix repose sur une étude critique détaillée proposée par [91] et [97]

III.5.1.6.1 Filtrage

Le filtrage des données est une étape qui a lieu après l'acquisition des signaux d'entrée-sortie et avant leur utilisation par une méthode d'identification.

La valeur instantanée de la largeur ou de la hauteur est difficile à interpréter à cause des nombreuses *fluctuations* dues aux mouvements de convections du bain liquide et au bruit intrinsèque au processus de la mesure. Ces signaux font l'objet, comme l'ensemble des mesures, d'un *lissage* sous la forme d'une moyenne mobile. Ce traitement assure l'élimination des points aberrants (irrégularités expérimentales) et diminue l'écart de mesures dû à la convection, en substituant à la valeur du point courant la moyenne des valeurs appartenant à la fenêtre centrée sur ce point. La Figure III.13 présentée ci-dessous, montre l'efficacité de cette méthode.



(a) (b)

Figure III.13 – Filtrage des données : (a) Largeur , (b) Hauteur

On a également utilisé un *filtre passe-bas* pour réduire l'énergie des bruits qui sont en dehors de la plage de fréquences d'intérêt pour l'identification (élimination des fréquences hautes). Afin de mettre en évidence l'effet du réglage du filtre, on a évalué l'effet des variations de l'ordre et la bande passante sur la qualité de l'estimation. Le filtre considéré est un filtre numérique passe-bas de Butterworth d'ordre 4, de fréquence de coupure $n\frac{f_e}{2}$ où fe est la fréquence d'échantillonnage et où n est un réel compris entre 0 et 1.

III.5.1.6.2 Elimination de la composante continue et normalisation

Les modèles résultant d'une linéarisation d'une dynamique non-linéaire autour d'un point de fonctionnement P_o sont particulièrement sensibles aux dérives du système autour de ce régime stationnaire. Une solution largement employée pour les modèles paramétriques consiste à exploiter les variables d'entrée-sortie en termes de variables d'écart $\tilde{u}(k)$ et $\tilde{y}(k)$, autour d'un point $P_o = \{\bar{u}, \bar{y}\}$ connu [97]:

$$\begin{cases} \tilde{u}(k) = \mathrm{u(k)} - \bar{u}, \\ \tilde{y}(k) = y(k) - \bar{y} \end{cases} \qquad \text{(III.2)}$$

L'élimination des composantes continues ($\bar{u}, \bar{y}$) (data detrending) assure la robustesse du modèle face aux problèmes de dérive (drift) lente autour de P_o et aux difficultés engendrées par les dynamiques non modélisées.

Afin d'éviter le risque de privilégier certaines données, un traitement ad hoc consiste à les *normaliser* par un changement de variable qui permet la réduction de l'espace des entrées-sorties dans un même intervalle où toutes les composantes physiques sont représentées avec la même étendue maximale (atténuer l'effet d'échelle[64]). En pratique, la normalisation permet d'exprimer par une transformation linéaire, les variables d'entrée $V \in [V^{min}, V^{max}]$, en $X \in [X^{min}, X^{max}]$ (pour les Xi variables normalisées, le domaine de normalisation choisi est en général : [-1,0], [0,1] ou [-1,+1]), par application de la relation suivante :

[64] (même pour les variables de faible amplitude).

$$Xi = \frac{X_i^{max} - X_i^{min}}{V_i^{max} - V_i^{min}} V_i + \frac{V_i^{max} \cdot X_i^{min} - V_i^{min} \cdot X_i^{max}}{V_i^{max} - V_i^{min}} \quad \text{(III.3)}$$

III.5.2 Choix de la structure des modèles locaux

Comme toute modélisation, la première étape concerne la spécification de la structure de chaque modèle local qui consiste à déterminer la relation qui explique le modèle dans son domaine de validité. Nous avons opté de représenter les modèles locaux correspondant aux différents points de fonctionnement, par des *modèles paramétriques autorégressifs de type ARX*[65] *(AutoRégressif a variables eXogènes).*

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à l'identification des paramètres d'un modèle de structure ARX : un système dynamique linéaire discret [97]. Il permet de décrire le comportement d'un système en reliant ses sorties y à un instant k[66] notées $y(k)$ aux valeurs des sorties aux instants précédents $k-1,\ k-2,\ k-3$,… notées $y(k-1),\ y(k-2),\ (k-3),$ … et des entrées u aux instants précédents $k-1, k-2, k-3$,… notées $u(k-1), u(k-2), u(k-3)$:

$$\begin{aligned} y(k) + a_1\, y(k-1) + \cdots . a_{na}\, y(k-na) \\ = +b_1\, u(k-1) + \cdots . b_{nb}\, u(k-nb) + e(k) \end{aligned} \quad \text{(III.4)}$$

Où na et nb le nombre de sortie et d'entrée discrètes utilisées pour décrite la sortie à l'instant k et e représente un bruit de modèle supposé blanc, appelé variable exogène ou bruit d'état.

On rappelle que lorsque l'on cherche à réaliser un modèle dynamique, une perturbation de type bruit est modélisée par une séquence de variables aléatoires. Un bruit peut agir de différentes manières sur un processus. On distingue notamment *le bruit de sortie* (bruit additif qui affecte la mesure de la sortie du processus), et le *bruit d'état* (bruit additif qui affecte l'état du processus). Comme, en général, on ne connaît pas avec précision la nature du bruit qui affecte le processus, on doit effectuer des hypothèses sur celle-ci ; on déduit de celles-ci la structure du modèle, et l'algorithme utilisé pour l'ajustement des paramètres. En particulier, si le modèle est construit pour la synthèse d'une loi de commande, la prise en considération de l'existence d'une perturbation pendant la phase de modélisation peut améliorer les performances de la commande pour le rejet de cette perturbation. Ces problèmes ont été très largement étudiés dans le cas de la modélisation linéaire [97]. Dans le cadre de la modélisation non linéaire, ces considérations sont développées dans [91].

Afin d'alléger la notation et faciliter les calculs, on fait usage de l'opérateur de décalage q défini comme suit :

$$q^{-d} x(k) = x(k-d) \quad \text{(III.5)}$$

Où $d \epsilon \mathbb{N}$ est un entier naturel. On a alors :

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + \cdots + a_{na} q^{-na} \\ B(q) &= b_1 q^{-1} + \cdots + b_{nb} q^{-nb} \end{aligned} \quad \text{(III.6)}$$

L'équation aux différences (III.4) peut alors être réécrite sous une forme plus compacte :

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + e(k) \quad \text{(III.7)}$$

Nous nous sommes intéressés à *l'identification d'un modèle à temps continu*. La motivation réside dans le fait que les algorithmes de synthèse des lois de commande robuste, qui seront présentés dans le chapitre IV, donnent de meilleurs résultats dans leur version continue que dans leur version discrète. Dans le cas du système premier ordre qui est l'objet de notre étude, le modèle ARX peut être exprimé sous forme *d'une fonction de transfert en temps continu* (avec $na = 1$ et $nb = 0$):

[65] Ce modèle est aussi appelé equation error model structure.

[66] $k \in \mathbb{Z}$ est l'instant d'échantillonnage, i.e. un entier relatif tel que $t[s] = kT_e$ où T_e est la période d'échantillonnage en [s].

$$g(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = K\frac{1}{1+\tau s} \quad \text{(III.8)}$$

Avec $$K = \frac{b_1}{1+a_1}, \tau = -\frac{T_e}{\log(-a_1)}$$

Où $Y(s)$, $U(s)$ sont respectivement les transformées de Laplace des signaux d'entrée u et de sortie y et s représente la variable de Laplace.

La Figure III.14 montre un exemple de la *réponse indicielle d'un système du premier ordre* (c'est à dire la réponse du système à un échelon unité à l'entrée). On prend la transformée de Laplace inverse, et on obtient la réponse temporelle du système :

$$y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \cdot u(t) \quad \text{(III.9)}$$

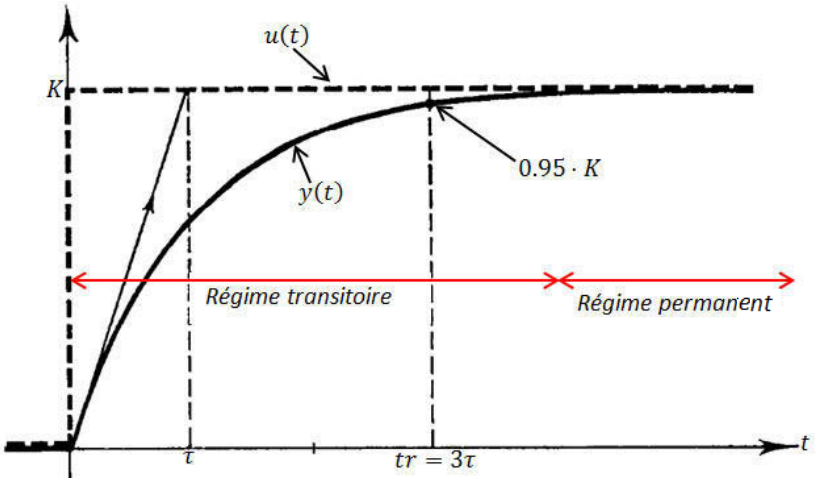


Figure III.14 – Réponse d'un système de premier ordre

On définit les *caractéristiques statiques et dynamiques du système* du premier ordre par les grandeurs suivantes :

- *Le gain statique* K caractérise le régime permanent, c'est-à-dire la valeur atteinte par la sortie au bout d'un temps infini (en pratique au bout de cinq fois la constante du temps).
- *La constante de temps* τ caractérise la rapidité du régime transitoire (dynamique du système)[67]. Cette rapidité peut être mesurée par :
  - le temps de réponse à 5% (tr). C'est le temps que met le système à atteindre 95% de la valeur finale. On peut vérifier que $tr = 3\tau$
  - Le temps de montée (tm). C'est le temps que met le système pour passer de 10 à 90% de la valeur finale. On peut vérifier que $tm = 2.2\tau$

Le diagramme de Bode d'un système de premier ordre montre un comportement d'un *filtre passe bas*, c'est-à-dire une chute du gain à partir de la pulsation de coupure $\omega_0 = 1/\tau$ et un déphasage nul aux basses fréquences.

III.5.3 Estimation des paramètres

Nous avons vu que l'identification d'un multi modèle permet de spécifier la structure des modèles locaux et des zones de fonctionnement. Cette étape conduit à l'établissement d'une famille de

[67] Notons que la tangente à l'origine coupe la valeur finale à t= τ. On peut vérifier qu'à t= τ, la courbe est à 63% de la valeur finale.

fonctions de la forme (équation (III.1)). Cette famille de fonctions est paramétrée par le vecteur de paramètres θ_i, définissant la structure du modèle local i, et le vecteur de paramètres β_i, caractérisant la zone de validité de ce même modèle local (Figure III.15).

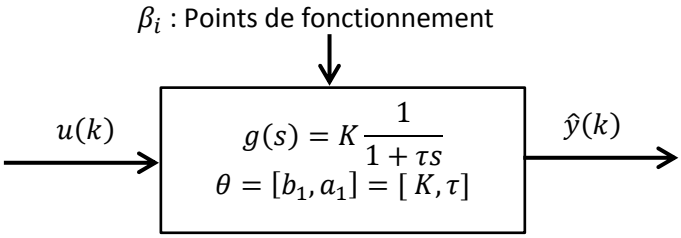


Figure III.15 – Estimation paramétriques des multi modèles

Le but d'une *procédure d'estimation parametrique* est de déterminer pour chaque modele local i les valeurs numériques de ces deux paramètres b_1 et a_1 (K et τ) de façon à ce qu'un critère de performance J (ou *fonction de coût*) du modèle soit *optimal* dans le but d'approcher la sortie du système par celle du modèle, on parle alors de *méthodes globales de minimisation* ou méthodes directes. Ce critère de performance est une fonction de l'écart appelée aussi erreur de prédiction entre la sortie réelle du système et celle du modèle.

L'erreur de prédiction (appelé aussi *résidu*) entre la sortie réelle du système et celle du modèle est obtenue par :

$$\varepsilon(t) = y_s(t) - \hat{y}(t) \tag{III.10}$$

Le critère quadratique (ou la fonction de coût des moindres carrés) est le plus utilisé. Il s'exprime par:

$$J = \frac{1}{2}\sum_{t=1}^{N}\left(\varepsilon(t)\right)^2 \tag{III.11}$$

où N désigne le nombre de mesures (taille de la séquence). Cette fonction scalaire positive est nulle uniquement si les sorties du modèle correspondent parfaitement aux mesures.

Les méthodes d'estimations utilisées pour la minimisation de la fonction de coût sont ceux disponibles sous MATLAB dans la Toolbox ident. Pour plus de détails, sur les algorithmes de minimisation de la fonction de coût, le lecteur pourra se reporter aux livres [73] [97]. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les méthodes de type moindres carrés[68]. Les résultats sont confirmés tant au niveau du nombre d'itérations nécessaires pour atteindre le critère d'arrêt qu'au niveau de la précision des modèles identifiés.

Notons que ces modèles entrée-sortie permettent de représenter simplement des procédés physiques complexes, mais il est bien clair que les paramètres intervenant dans ces modèles perdent toute signification physique. Ils permettent cependant de mieux évaluer les caractéristiques du procédé (dynamique, stabilité,….etc) pour la synthèse d'une loi de commande

III.5.4 Résultats d'identification

Les valeurs numériques des paramètres estimés des modèles de la largeur du bain pour l'ensemble des points de fonctionnement sont données dans le Tableau III.2. Pour chaque point de fonctionnement on a réalisé au moins 5 mesures. Des calculs d'erreur sur la constante de temps et le gain ont été effectués à partir des écarts-types calculés d'après les dispersions moyennes des

[68]La méthode des moindres carrés, indépendamment élaborée par Legendre en 1805 et Gauss en 1809, permet de comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure, à un modèle mathématique censé décrire ces données. Elle peut être divisée en deux catégories, linéaire (admettant une solution analytique) et non linéaire (solution par itération numérique) [91] [92].

résultats d'identification. Le modèle du procédé est identifié en temps continu et l'effet de la caméra est identifié simultanément avec les autres dynamiques du système. *Notons que la bande passante des capteurs est généralement bien plus grande que celle des effets mesurés, c'est pourquoi leurs dynamiques sont souvent modélisées par un très petit retard ou bien tout simplement négligées*.

Vitesse (mm/min)	Puissance (W)	K (mm/V)	τ (ms)	FIT[69] (%)
100	400	2.02±0.07	179.40±24.22	72.96±2.13
	700	1.71±0.07	181.80±23.37	65.50±3.16
400	600	1.41±0.03	56.50±4.23	88.13±0.41
	900	0.93±0.12	64.80±11.23	79.31±15.52
800	800	0.69±0.20	39.40±8.36	80.94±4.52
	1000	0.35±0.13	46.80±16.53	59.38±11.63

Tableau III.2 – Résultats expérimentaux d'estimation de la largeur du bain

Les modèles dynamiques du procédé de projection laser que nous avons identifiés présentent l'avantage de pouvoir décrire son comportement à la fois en régime permanent (à l'équilibre) et en régime dynamique (transitoire). Il faut noter que cette caractérisation de la réponse du procédé de projection laser est à refaire pour chaque nouveau matériau. *Il serait donc souhaitable qu'elle soit intégrée dans la procédure de recette d'identification ou dans les données du constructeur si notre méthodologie de mesure est choisie*.

La Figure II.16 représente l'influence des conditions opératoires (puissance laser et vitesse) sur l'évolution des paramètres du modèle (c'est-à-dire le gain statique et la constante de temps) pour les différents points de fonctionnement. Dans certains cas, notamment la variation de la constante de temps, un écart type important est observé. Cependant, afin d'élaborer la loi de commande, nous allons supposer que le modèle linéaire reste valable autour du point de fonctionnement par rapport à cette variable. Par ailleurs *les écarts observés seront pris en compte comme des incertitudes lors de l'élaboration de la loi de commande*. Enfin, des confrontations entre les résultats de simulations et expérimentaux sont présentés dans la partie suivante afin de valider le comportement dynamique du modèle du procédé de projection laser.

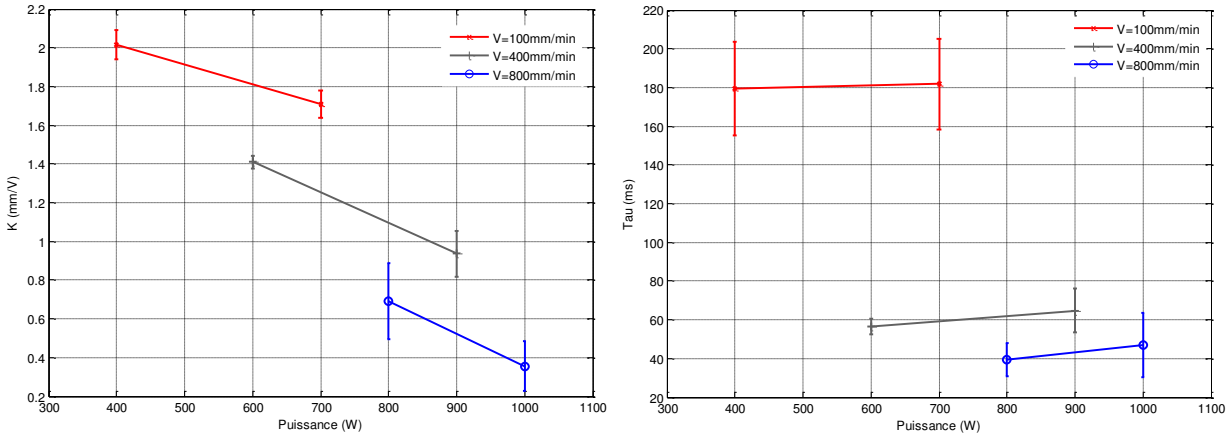


Figure III.16 – Gain statique et constante de temps du procédé pour les différents points de fonctionnement

[69] Indicateur de ressemblance (FIT) qui consiste à observer si les résidus (c'est-à-dire l'écart entre les sorties du système $y_s$et du modèle $\hat{y}$) est faible ou non. Sa valeur optimale est 100% quand les deux signaux sont égaux. Ce critère est donné par l'expression : FIT=$100\left(1-\frac{|y_s(t)-\hat{y}(t)|}{|y_s(t)-\overline{y_s}(t)|}\right)$Où $\overline{y_s}(t)$ est la moyenne de $y_s(t)$

Globalement, les résultats de l'identification obtenus sont logiques et concordent avec la réalité physique du procédé :

- la constante de temps diminue avec l'augmentation de la vitesse, ce qui signifie que la réponse du système est plus rapide (très grande bande passante) avec l'augmentation de la vitesse. En effet, *lorsque la vitesse diminue, le temps d'interaction entre le bain et le laser est élevé*, et donc il y a un grand volume de bain (poudre déposée par unité de surface) qui introduit une inertie, ce qui donne un temps de réponse plus grand. Plus le volume est petit, plus l'inertie est faible et inversement.
- La constante du temps dépend essentiellement de la vitesse de déplacement. Celle-ci, conditionne en effet *le temps d'interaction entre le bain, le laser et la quantité de matière apporté au bain liquide.* Par ailleurs, elle ne montre pas de variations notables avec la puissance.
- Le gain dépend de la puissance laser et de la vitesse. Il diminue avec $(P/\sqrt{V})$ et d'une manière linéaire avec $(P\sqrt{V})$ (Cf. §III.5.6).

L'influence de la puissance et de la vitesse sur les caractéristiques statiques et dynamiques du procédé sont résumées sur la figure ci-dessous :

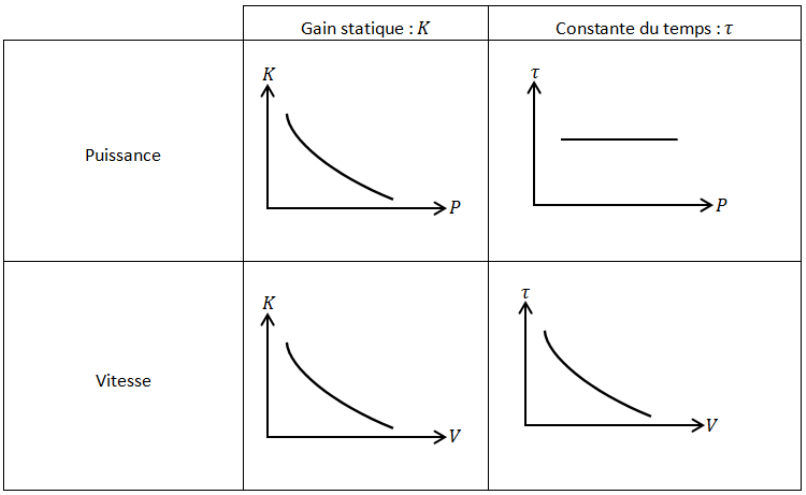


Figure III.17 – l'influence des paramètres puissance (P) et vitesse (V) sur le gain et la constante de temps

Les observations faites au niveau de la Figure III.17 sont conformes au modèle phénoménologique présenté dans le chapitre I et on retrouve les mêmes tendances sur l'évolution des dimensions du bain en fonction des paramètres procédés (Puissance, Vitesse et Débit). Ces tendances sont également en accord avec les résultats obtenus par [41] *dans le procédé de traitement de surface d'alliage en TA6V.*

La même procédure d'identification de modèle a aussi été appliquée pour le modèle de la hauteur du bain.

III.5.5 Validation des résultats

Il n'est pas suffisant qu'une méthode d'estimation soit capable de déterminer les valeurs des paramètres dans des conditions idéales. Il faut également qu'elle soit capable de vérifier si la structure du modèle avec ses paramètres reproduisent les données mesurées, avec une précision satisfaisante, malgré les erreurs liées aux imperfections du modèle (phénomènes négligés, idéalisation de la réalité).

Un test important appelé validation croisée consiste à évaluer la capacité du modèle à reproduire la sortie du système pour un jeu de données d'entrée qui n'a pas servi à l'estimation des paramètres. Il

s'agit d'un gage de qualité qui en éprouvant le système le plus possible, permettra de mieux se rendre compte de la possible dégradation entre les données mesurées et les données simulées par le modèle préalablement identifié.

Afin de valider ou d'invalider les modèles, nous menons dans ce paragraphe une analyse des modèles obtenus. Pour limiter le nombre de figures, nous avons choisi de présenter les résultats expérimentaux de la largeur obtenus pour le point de fonctionnement P400V600Dm1 mais le raisonnement reste valable pour d'autres points. *La sortie mesurée et estimée en identification et en validation* est représentée sur la Figure III.18. Le *résidu* obtenu est présenté sur la Figure III.19 et les *fonctions d'autocorrélation* de résidu[70] sur la Figure III.20 avec des intervalles de confiance de 99%.

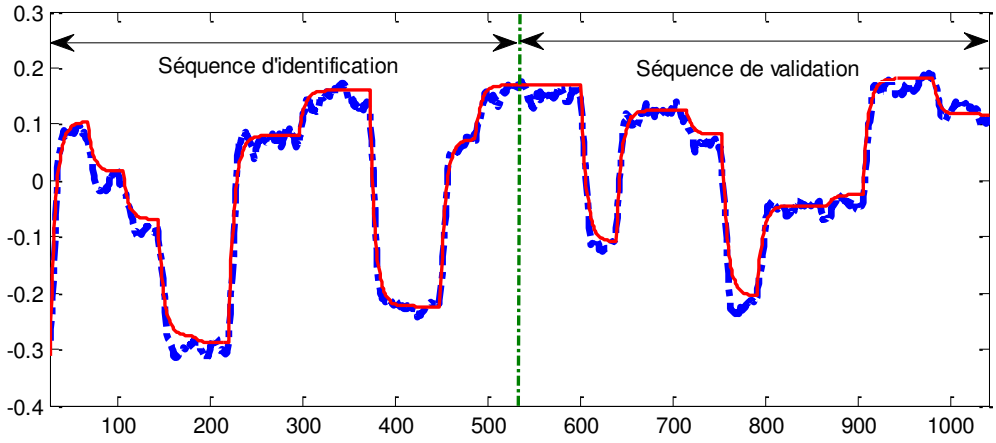


Figure III.18 – Comparaison de la sortie du modèle de la largeur (trait plein rouge) avec la sortie mesurée (trait discontinue bleu)

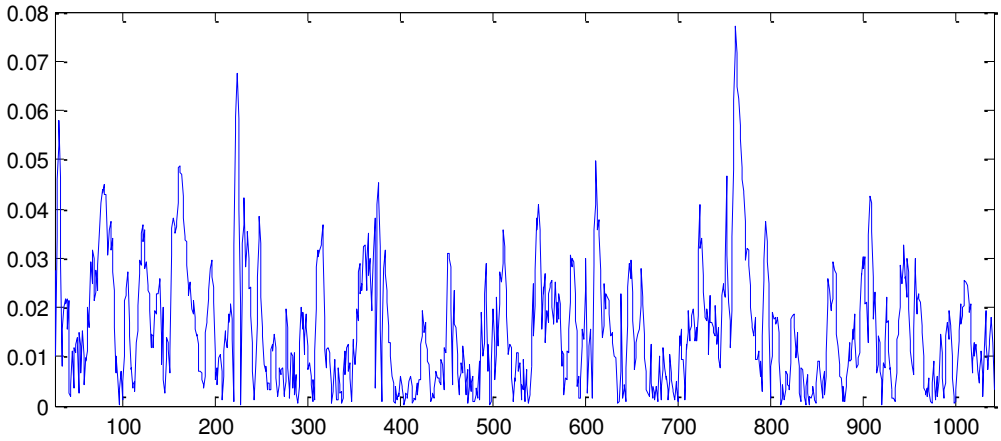


Figure III.19 – Résidu obtenu

[70] En théorie, si la structure du modèle ainsi que sa complexité sont bien choisis, l'erreur de prédiction $\varepsilon(t)$ doit tendre vers un bruit blanc. Alors, pour vérifier si $\varepsilon(t)$ est un bruit blanc on calcule la fonction de l'autocorrélation normalisée de l'erreur de prédiction ainsi que la fonction de corrélation normalisée entre l'entrée et l'erreur de prédiction et on vérifie que ses valeurs sont proches de zéro sur un intervalle de confiance.

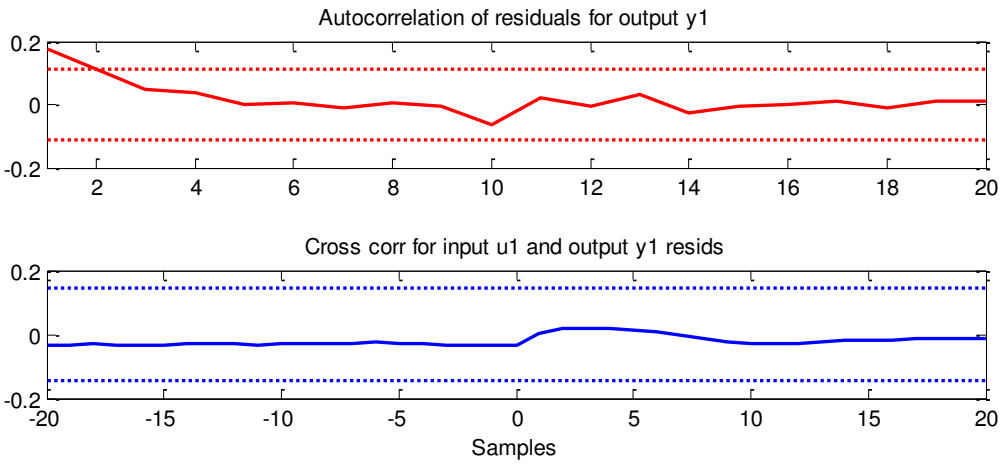


Figure III.20 – Test de corrélation pour le modèle estimé

Comme on le voit sur la Figure III.18, *les deux sorties coïncident très bien*. Les critères RMSE[71] des jeux de données d'identification et de validation sont respectivement de 0.0206 et de 0.0193. Le comportement dynamique du procédé de projection laser est donc bien approché par le multi-modèle identifié. En revanche, l'apparition de pics d'erreurs (Figure III.19), dans certaines zones de commutation du signal de commande, détériore la qualité de l'approximation obtenue. Ces pics sont une conséquence des phénomènes mal identifiés (dynamique non modélisée, perturbations). Ces phénomènes agissent comme des éléments perturbateurs dans la procédure d'identification même si globalement la dynamique est respectée.

D'après la Figure III.20, on peut remarquer que les résidus sont blancs et totalement non corrélés avec le signal d'entrée. *Le modèle estimé est donc satisfaisant*.

Comparons finalement les réponses indicielles de la largeur et de la hauteur. A partir de la Figure III.21, on peut observer que la hauteur réagit plus lentement que la largeur.

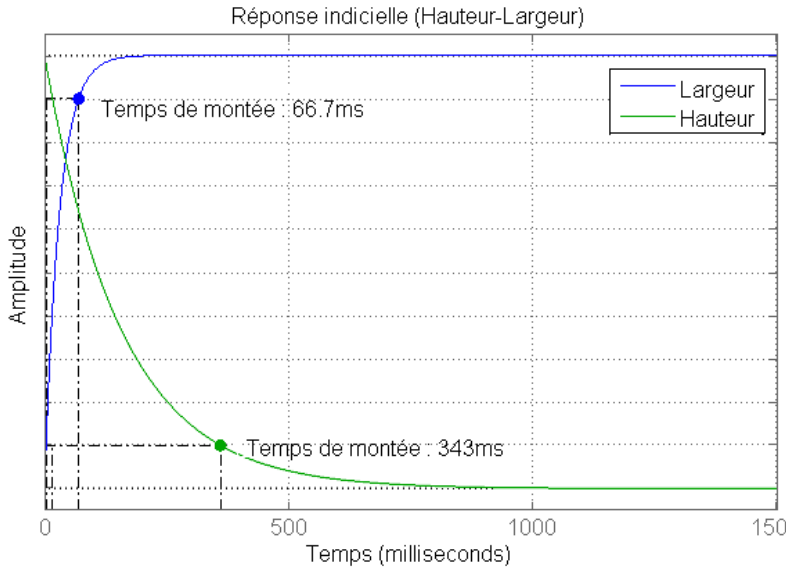


Figure III.21 – La réponse indicielle de la largeur (hauteur) à une commande en puissance (vitesse)

[71] Erreur quadratique moyenne (en anglais Root Mean Square Error) : c'est une mesure globale sur le nombre total de points de l'écart entre les sorties du système et du modèle.

III.5.6 Comparaison avec les données expérimentales

La Figure III.22 indique respectivement le gain statique expérimental et calculé à partir des modèles d'identification. L'ensemble des valeurs utilisées pour les paramètres opératoires est basé sur les expériences menées par [5] dans le cadre du projet PROFIL.

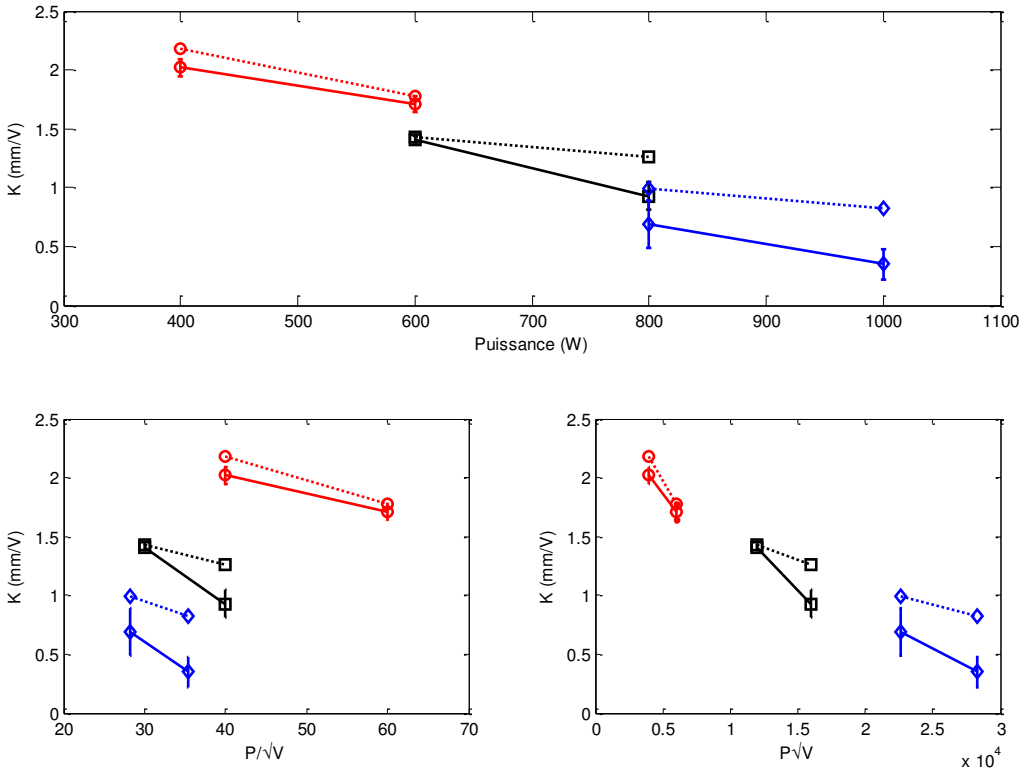


Figure III.22 – Evolution du gain statique de la largeur en fonction de la puissance, de $P/\sqrt{V}$ et $P\sqrt{V}$ (Trait plein : Résultats d'identification ; Trait discontinu : Résultats expérimentaux ; ○ 100mm/min ; □ 400 mm/min ; ◊ 800 mm/min)

On peut ainsi voir que les résultats d'identification reproduisent les tendances observées expérimentalement, à savoir : Le gain dépend de la puissance laser et de la vitesse. Il diminue avec $(P/\sqrt{V})$ *et d'une manière linéaire avec* $(P\sqrt{V})$.

L'ordre de grandeur des dimensions du bain liquide calculées par le modèle est très satisfaisant, excepté que le gain statique prédit par le modèle est inférieur à la mesure expérimentale. Ces différences entre expérience et modèle s'expliquent principalement par la manière dont les observables ont été mesurés. Dans le cas de MAISONNEUVE les mesures de la dimension des couches (Hauteur et largeur) sont faites au pied à coulisse et dans notre cas directement par traitement d'images à partir des vidéos du bain liquide. Il a été observé que les mesures au pied à coulisse introduisaient des incertitudes et une dispersion dans les mesures. De plus, ces mesures sont perturbées par la présence plus ou moins prononcée d'agglomérats, et les variations de largeur du mur.

Un terme correcteur rendant compte de cet écart pourrait être envisagé et serait facile à quantifier. D'un point de vue traitement d'image, le terme correcteur doit permettre de rendre compte de la dépendance de la valeur du seuil par rapport aux paramètres procédés (Puissance et Vitesse).

III.6 Analyse du comportement thermique

Dans la partie précédente, nous avons identifié des modèles du procédé de projection laser, pour différents points de fonctionnement. Cette identification s'est faite dans l'état stationnaire du procédé (c'est-à-dire sur la dernière couche du mur) pour s'affranchir du phénomène du pompage et ainsi s'assurer d'une bonne reproductibilité des modèles. Or, nous savons que le procédé de projection laser est non linéaire et non stationnaire, ce qui implique des incertitudes sur les paramètres des modèles. Ces incertitudes peuvent provenir de la présence de certains phénomènes dans le comportement du système physique qui ne sont pas pris en compte directement par le modèle. Comme exemple de paramètres incertains affectant le procédé, *on peut citer la construction d'une pièce de plusieurs couches dans lequel la thermique du procédé change au fur et à mesure de l'élévation de la pièce*. Il est évident que ces phénomènes de types thermiques ne peuvent être négligés, car ils dominent fortement l'évolution de différents paramètres du modèle global. Cependant, il est nécessaire d'analyser et d'étudier leur importance ainsi que l'incidence de ces phénomènes sur le comportement du modèle global.

Pour mener cette étude, on a réalisé des murs sur deux points de fonctionnement, et tout au long du mur, on a fait varier la puissance et la vitesse avec les signaux d'excitation présentés dans § III.5.1.4. On a réalisé également des mesures de température par couche, lors de la construction au moyen d'un pyromètre laser Infrarouge IMPAC de type IGA 120 MB18, dont la plage de mesure s'étend de 350 à 1800°C. Le pyromètre a été calibré par une mesure comparée de la température dans un substrat en TA6V sur lequel était fixé un thermocouple et à côté duquel une mesure de la luminance par pyromètre est effectuée simultanément. La comparaison entre ces deux mesures (thermocouple et pyromètre) conduit à l'établissement de la courbe d'étalonnage du pyromètre.

Les mesures par le pyromètre n'ont pas permis de déterminer précisément les températures atteintes par le bain liquide[72] et cela s'explique par la position du pyromètre qui a été positionnée à 1mm par rapport au bord du substrat. En revanche en faisant une moyenne de la température par couche et on considérant les gradients de température dans la zone concernée faibles, ceci nous a permis de dégager des tendances relativement correctes sur l'évolution de la température en fonction du nombre de couches déposées (Figure III.23), de la puissance et de la vitesse (Figure III.24).

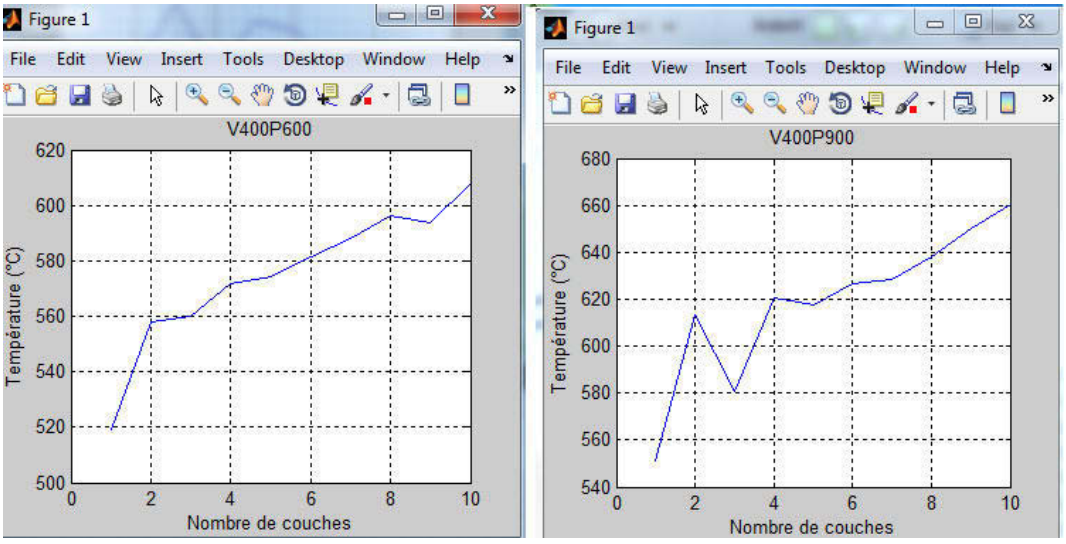


Figure III.23 – Evolution de la température de luminance moyenne en fonction du nombre de couches déposées.

[72] On rappelle que la température de fusion du TA6V est de 1660°C.

Il apparaît clairement de la Figure III.23 que *la température augmente avec le nombre de couches déposées précédemment*. Cette tendance se retrouve également dans l'étude de [5] (Voir Figure II.4) et s'explique par le fait que le substrat étant froid au départ de la construction du mur, la température du bas du mur augmente au fur et à mesure que les couches sont empilées puis diminue lorsque les pertes énergétiques par conduction via le substrat deviennent prédominantes comparées à l'énergie apportée pour accroître la hauteur du mur.

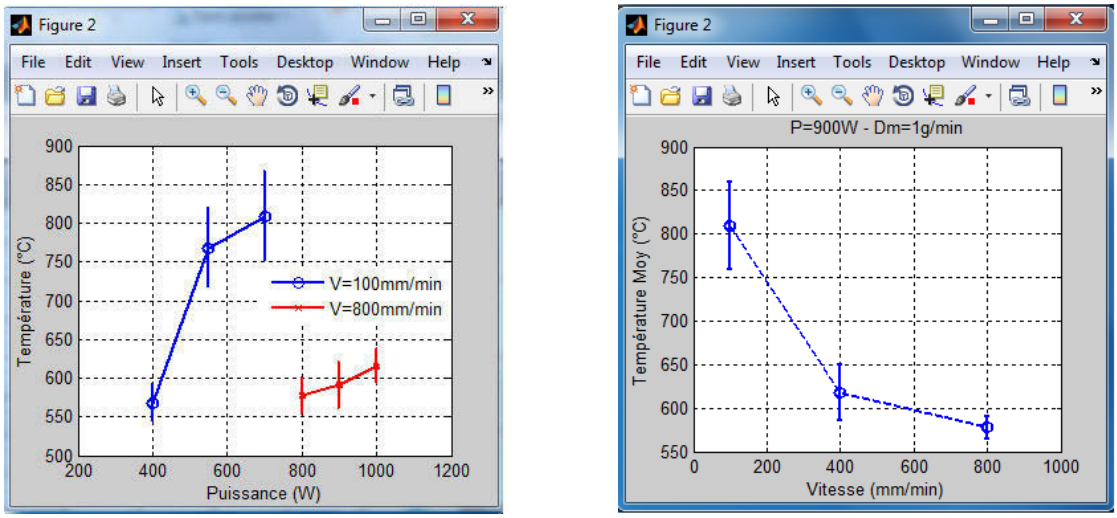
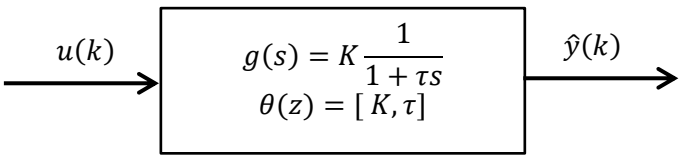


Figure III.24 – Evolution de la température de luminance en fonction de la puissance et de la vitesse

On voit également sur Figure III.24 l'influence de la puissance laser et de la vitesse de déplacement sur la température. *Ces tendances sont également constatées dans la littérature* [26] *(Voir Figure II.3)*. *La température augmente avec la puissance et diminue avec la vitesse*. L'impact de la puissance vis-à-vis de la température est plus prononcé que celui de la vitesse. L'explication tient au fait que la vitesse V modifie à la fois la quantité d'énergie P/V apportée au mur et la quantité de poudre injectée dans le bain liquide (donc la hauteur) alors que la puissance P ne fait qu'augmenter l'énergie linéique (la hauteur reste constante quand P augmente). Dans tous les cas, le gradient thermique est vraisemblablement très fort autour du bain liquide et augmente avec la puissance [6].

De la même manière que nous avons pu déterminer la fonction de transfert sur la dernière couche du mur, nous pouvons à présent *identifier les modèles couche par couche*. Ainsi pour chaque couche, nous déterminons le vecteur de paramètres θ :



Où $\theta(z)$ représente le vecteur de paramètres incertains et z est l'élévation de la pièce (ou le numéro de couche). Si on suppose que le vecteur des paramètres s'écrit $(z) = \theta_0 + \Delta\theta$, la partie qui comprend l'incertitude est $\Delta\theta$. Nous en déduisons les deux valeurs extrêmes de la constante du temps et du gain statique du domaine décrivant les incertitudes sur les paramètres du modèle.

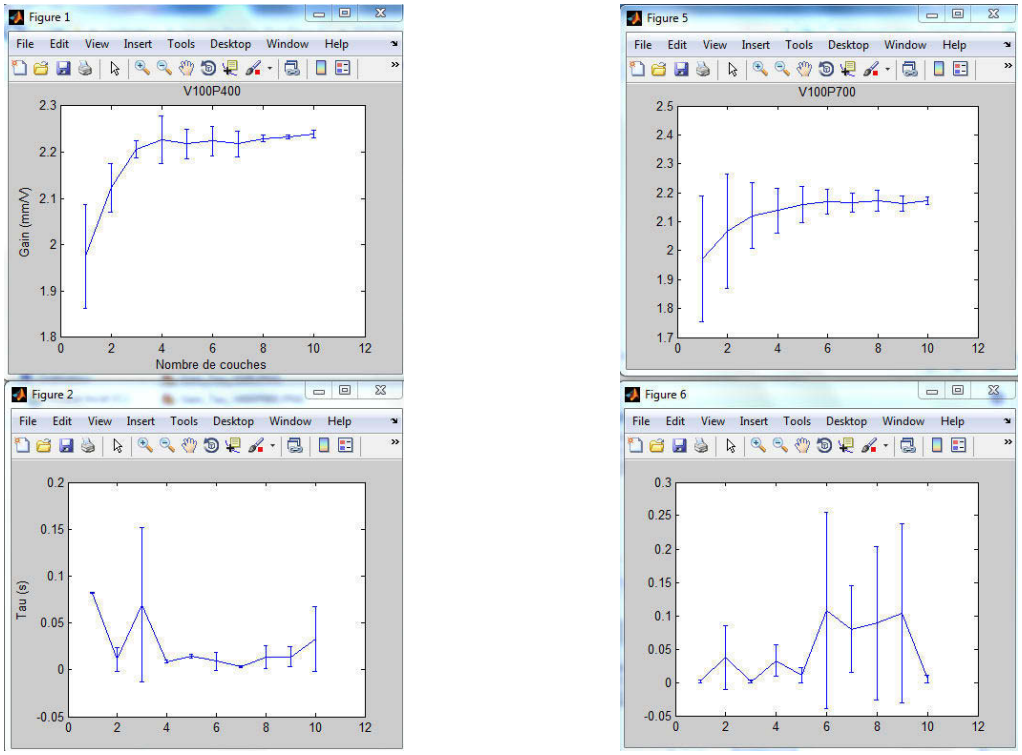


Figure III.25 – Evolution du gain statique et de la constante de temps en fonction du nombre de couches déposées.

L'application des algorithmes d'identification n'a pas donné de très bons résultats en termes de précision en régime dynamique. Par ailleurs, *on constate que l'erreur en régime permanent était relativement faible au fur et à mesure qu'on s'approchait du régime stationnaire (c'est-à-dire qu'on s'éloigner du substrat) où la largeur du bain n'évolue plus en fonction de l'altitude de la couche.*

Ces figures mettent en évidence que la conduction de chaleur dans le matériau influence considérablement le comportement du modèle complet. Cette influence est d'autant plus visible en régime stationnaire où le gain statique augmente au fur et à mesure que la couche considéré est éloignée du substrat. Ce gain statique suit la même évolution que celui de la largeur présenté sur Figure III.5.

A travers ces constatations, on peut conclure que les phénomènes thermiques jouent un rôle important sur le comportement du modèle, et influencent l'évolution de l'ensemble des variables du procédé. Par conséquence, Il est important de tenir compte de ces phénomènes lors de la synthèse de loi de commande au risque d'altérer fortement le comportement du procédé (Cf. §IV.5.4.1). Toutefois, cette étude peut être améliorée en faisant une étude plus approfondie sur le comportement thermique du procédé. Cependant, il est nécessaire d'avoir un banc bien instrumenté avec des caméras thermiques dans les zones sensibles du profil du bain liquide. Ceci nous donnera plus d'information pour améliorer ces modèles.

III.7 Conclusion

Avant d'aborder la commande du procédé de projection laser, ce chapitre avait pour but de montrer que les modèles de connaissance (où le modèle obtenu est normalement motivé par des fondements des lois de la physique) restent très complexes pour les rendre plus facilement manipulables à des fins de commande en temps réel.

Un autre aspect important de ce chapitre concerne en particulier une autre approche de modélisation dite boîte noire (ou expérimentale). La méthode d'identification basée sur l'approche

multi modèles a été utilisée pour l'identification des modèles du procédé de projection laser à partir des données entrée-sortie obtenues expérimentalement pour plusieurs conditions opératoires. Ces modèles représentent la relation dynamique entre l'entrée de commande (puissance/vitesse) et la sortie mesurée par les caméras (largeur/hauteur). De plus, pour consolider le comportement du modèle, des validations expérimentales ont été faites en comparant la sortie expérimentale, à la sortie du modèle. Les résultats obtenus montrent que le modèle traduit correctement la dynamique du procédé.

CHAPITRE IV

Contrôle-Commande du procédé

IV.1 Introduction

On a vu aux chapitres précédents à travers l'étude bibliographique et les résultats expérimentaux que le procédé de projection laser est multivariable, non-linéaire et non-stationnaire. A ces propriétés on peut ajouter les instabilités et les perturbations externes, elles ne sont pas connues a priori et peuvent être très variables dans le temps. A ces problèmes de connaissance du processus, il convient d'ajouter ceux liés à l'identification des modèles du procédé de projection laser à partir des données entrée-sortie, obtenues expérimentalement pour plusieurs points de fonctionnement. Ces modèles représentent la relation dynamique entre l'entrée du procédé (puissance/vitesse) et la sortie mesurée par les caméras (dimensions du bain : largeur/hauteur). De plus, des hypothèses simplificatrices étaient nécessaires afin de faciliter la modélisation du processus. Elles sont indispensables pour une réalisation technologique de la commande temps réel[73].

La commande d'un processus doit non seulement maîtriser sa réponse pour lui imposer un comportement désiré, mais également maintenir son comportement face aux dérives des paramètres physiques, aux perturbations externes et cela, en dépit des imperfections du modèle. Plusieurs approches de commande permettent d'appréhender ces problèmes, en particulier la commande adaptative et la commande robuste. Ces deux approches différentes dans le sens où la commande adaptative suit les variations des paramètres et adapte le correcteur à ces variations, alors que la commande robuste permet d'établir des correcteurs à paramètres fixes valables dans un domaine de fonctionnement lié aux incertitudes paramétriques. Elles diffèrent aussi dans le sens où la première s'intéresse à la robustesse en stabilité et performance a posteriori, alors que la seconde le prend en compte a priori.

L'application de ce deuxième type d'approche au procédé de projection laser, nous a permis de résoudre de façon élégante le problème du maintien du procédé dans des conditions opératoires stables et optimales en dépit de perturbations et des incertitudes pouvant affecter son bon fonctionnement.

Après une présentation des différents travaux menés sur la commande des procédés de projection laser, nous allons présenter dans ce chapitre une vue d'ensemble de la commande robuste. Dans cette étude nous restreindrons nos investigations à une commande H_∞. Le chapitre s'achève avec la synthèse d'un contrôleur H_∞ pour le procédé de projection laser qui utilise un modèle en boucle ouverte identifié selon la méthodologie présentée dans le chapitre précédent. La loi de commande élaborée a été appliquée à la machine LIMOGES. Différentes manipulations ont été réalisées pour valider la stratégie de commande développée en termes de suivi de consigne, de rejet de perturbations et de robustesse.

IV.2 Etat de l'art du contrôle-commande du procédé de projection laser

Nous présentons dans cette section un état de l'art concernant les techniques de contrôle/commande des procédés de projection laser. Le travail consiste ensuite à définir la stratégie de commande qu'il faut réaliser. Il convient de distinguer alors la finalité de l'étude. Si l'on s'intéresse à une étude théorique, toutes les solutions seront possibles et admissibles. Par contre, si la finalité

[73] Une commande est dite temps réel si elle est suffisamment performante pour traiter à la volée et sans perte d'information toutes les données provenant d'un ou plusieurs capteurs, sans atteindre la capacité maximale de calcul qu'elle a à sa disposition. Ainsi, toutes les données en entrée sont prises en compte par l'acquisition et participent à la tâche réalisée. Dans la plupart des cas, les données sont traitées suffisamment rapidement pour permettre l'obtention des résultats en un temps inférieur à la constante de temps régissant l'évolution du procédé perçu par les capteurs.

est de réaliser l'automatisme considéré, les relations entre la technologie disponible, son coût, la confiance que l'on peut y apporter et les stratégies sont à prendre en compte. Ainsi, la meilleure stratégie sur le papier n'est pas forcément réalisable car le capteur ou l'actionneur n'existent pas. Il existe alors une démarche itérative entre le choix et l'étude d'une stratégie, sa réalisation technologique, puis économique et la validation de la solution retenue parmi plusieurs. Il doit être clair que les problèmes d'automatique ont toujours plusieurs solutions et que la réalisation résulte d'un compromis qui oscille entre complexité des outils mis en œuvre (donc technicité des développeurs) et adéquation avec les besoins. Le choix du type de loi de commande va dépendre de la connaissance disponible a priori sur le procédé. De ce point de vue, *il convient de rappeler ici quelques règles élémentaires pouvant orienter l'utilisateur dans son choix* (Oliver, 2000) [80] :

- lorsqu'un modèle analytique suffisamment précis – quelle qu'en soit sa nature – est disponible, alors il faut l'utiliser ;
- si un modèle analytique n'est pas disponible mais que l'expertise disponible sur le fonctionnement du procédé est importante, alors les approches heuristiques (logique floue, systèmes à base de connaissance, etc.) peuvent être utilisées ;
- lorsqu'un modèle analytique s'avère très complexe ou trop long à obtenir, mais qu'en revanche une grande quantité de données est disponible, alors il peut être intéressant d'utiliser une approche de type boite noire permettant d'obtenir des modèles simples offrant un bon compromis entre une bonne capacité d'approximation du comportement non linéaire du procédé et une complexité réduite du modèle pour une implémentation temps réel dans un schéma de système de commande.

A la lecture de la bibliographie sur les techniques (ou stratégies) de commande des procédés de projection laser, on retrouve plusieurs approches de commande. Sans vouloir être exhaustifs, nous essayons de faire un tour d'horizon concernant les techniques le plus souvent rencontrées dans la littérature :

- *Les algorithmes de commande classique* ont été largement appliqués aux procédés laser par linéarisation autour d'un ou plusieurs points de fonctionnement [12] [19] [31] [41] [42] [49] [50] [98] [99] [100]. On constate dans les faits que les boucles de commande implantées sont typiquement des régulateurs de type PID complètement découplées et mono-variables dépendant du point de fonctionnement. Ces études se basent sur une modélisation simpliste qui ne comporte pas tous les couplages existants entre les différents paramètres du procédé. Cependant, les lois de commande élaborées à partir de ces techniques sont souvent limitées en pratique, compte tenu de la diversité des phénomènes mis en jeu dans le procédé, ce qui nécessite de contrôler à la fois plusieurs variables et de tenir compte des non stationnarités, notamment lorsque qu'il y a des variations des conditions opératoires (changements de point de fonctionnement par exemple). Cela a conduit à la recherche de solutions de contrôle plus avancées et plus performantes.
- *la commande multivariable* proposée par (AUBRY, et al., 2008). Les entrées sont la puissance et la vitesse. Les sorties sont la surface et la hauteur du bain. La stratégie de commande élaborée pour ce système consiste en deux boucles de régulation par PID découplé. Toutefois, il est clair que la vitesse est corrélée à plusieurs paramètres du procédé et le simple fait d'ajouter la hauteur comme variable de sortie aurait compliqué les choses en créant des disfonctionnements de la régulation (couplage entre les variables). Pour cette raison, les auteurs ont préféré utiliser uniquement la puissance pour la régulation de la surface du bain. Ceci montre les limites des stratégies de commandes classiques (PID, PI, …) face à des procédés complexes et multivariables tels que les procédés de projection laser.
- *la commande adaptative*, consiste à réajuster certains paramètres intervenant dans le calcul de la commande en fonction de la dynamique du processus pour maintenir les performances du système lorsque les paramètres du modèle varient [101]. [12] ont proposé un correcteur PI simple adaptatif qui consiste à ajouter un modèle permettant d'ajuster de manière continue le

gain de la boucle en prenant en compte la variation des variables non-régulées (non stationnarité du procédé) (Figure IV.1). Malgré les avantages que présente cette approche, il est nécessaire d'avoir des modèles fiables et de faire une identification en ligne des paramètres de ces modèles. De plus, des contraintes doivent être imposées lors de l'identification afin de prendre en compte les propriétés physiques de certains phénomènes.

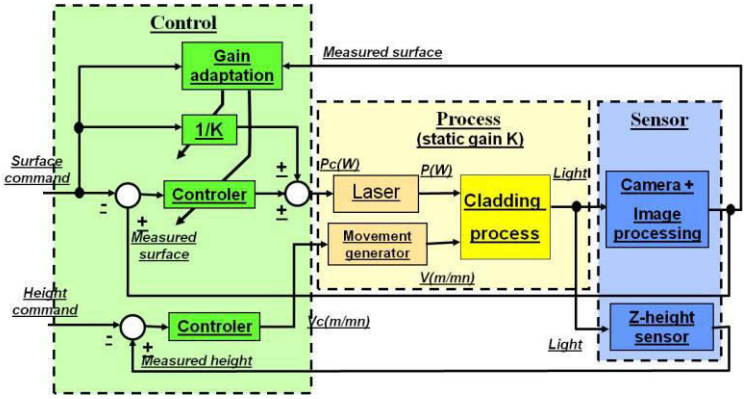


Figure IV.1 – Boucle de contrôle avec ajustement du gain (AUBRY, et al., 2008)

- *La commande prédictive* MPC (Model based Predictive Control) consiste à trouver la commande à appliquer connaissant un modèle de prédiction. Cette technique utilise donc le modèle dynamique du processus dans le contrôleur et permet ainsi d'anticiper le comportement futur du système [45] [71] [102] (Figure IV.2). Toutefois, le domaine de validation du contrôleur est limité à un faible intervalle de variation des conditions opératoires. Les paramètres du modèle varient significativement d'une expérience à une autre même en fixant les conditions opératoires. Le régulateur montre une faible robustesse vis-à-vis des incertitudes de modélisation ce qui nécessite un réglage fréquent de ce dernier.

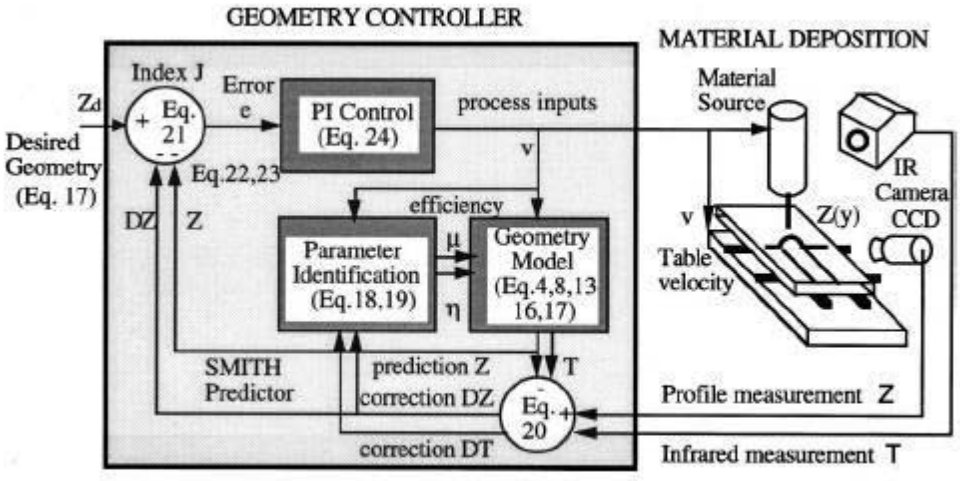


Figure IV.2 – Diagramme bloc du contrôleur prédictif auto-réglable [71]

- *la commande optimale*, intéressée à déterminer la commande qui permet, à partir d'un modèle et parmi les commandes admissibles : de vérifier des conditions initiales et finales données, de satisfaire diverses contraintes imposées et d'optimiser un critère mathématique choisi [16] [103]. Elle est de loin la technique la plus largement développée au niveau de la commande pour les procédés laser ;

Avec une compréhension croissante du comportement du procédé ainsi que les progrès au niveau des technologies de mesure, on voit l'apparition de nouvelles approches de commande des

procédés. Le concept de la commande dite intelligente[74] (*intelligent control*) a été suggéré comme approche alternative aux techniques de commande conventionnelles pour les systèmes de contrôle complexes et son application a attiré une grande attention de la communauté scientifique et industrielle [80]. L'objectif est de présenter de nouveaux mécanismes permettant une commande plus flexible, mais particulièrement plus robuste, capable de traiter les incertitudes et les variations de paramètre du modèle. On peut citer :

- la commande neuronale, qui s'avère intéressante pour la commande des systèmes en s'appuyant sur des modèles non-linéaires d'entrée-sortie obtenus à partir des données [104];
- la commande floue, qui consiste à représenter sous la forme de règles linguistiques la connaissance et le savoir-faire des opérateurs experts pour assurer le bon fonctionnement du procédé. Le contrôleur flou détermine directement la sortie de commande à partir de la base de connaissance experte et des données en ligne [82] [105] [81] [83] ;
- La commande neurofloue, technique visant l'exploitation des caractéristiques les plus avantageuses de chacune. On peut citer à titre illustratif la commande non-linéaire basée sur des modèles neuroflous du procédé de traitement de surface [86]
- *La commande à l'aide de multi modèles* dans le cas des systèmes dont le comportement dynamique est fonction d'une grandeur d'influence notée q et appelé « paramètre variable » pouvant évoluer sur un intervalle $[q_1, q_2]$ caractérisant l'ensemble fini des points de fonctionnement du procédé. *A notre connaissance, n'y a pas d'articles sur l'application de cette nouvelle technique dans les procédés de projection laser.*

Jusqu'à présent, nous avons peu abordé la question de la supervision (*monitoring*) des procédés de projection laser. *La supervision représente la surveillance[75] d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération face à des défaillances*[76]. En effet, dans les processus complexes et automatisés, les effets d'un défaut peuvent rapidement se propager conduisant alors à la dégradation des performances de ces processus ou, même pire, à des défaillances catastrophiques[77]. C'est pourquoi, les défauts de fonctionnement des processus doivent être rapidement détectés et localisés, et des décisions doivent être prises afin d'éviter la dégradation des performances ou la défaillance de ces processus.

La structure générale d'une application technique de supervision est illustrée sur la Figure IV.3. Au plus près du procédé se situe le niveau de l'instrumentation. Ce sont les *capteurs* (prise d'information sur le procédé), les *actionneurs* (réalisation des effets sur le procédé). C'est un niveau essentiellement constitué de technologies. Au niveau supérieur, on trouve le *contrôle procédé*. C'est vraiment ici que se situe le rôle de l'automatique. Il s'agit de corriger, en temps réel, le procédé pour garantir un fonctionnement répétable et rejeter les effets des perturbations. Enfin, un niveau supérieur dédié au *système de supervision* qui reçoit toutes les informations disponibles (appelées aussi observations) du procédé. Ce dernier est régulé par un contrôleur qui utilise les signaux de capteurs et envoie ses commandes aux actionneurs du procédé. Ainsi, l'ensemble des signaux de sortie de capteurs et de contrôleur (ou commandes d'actionneurs) constitue les variables connues (observations) du procédé. La Figure IV.3 montre bien les échanges entre les différents niveaux.

[74] Ce sont des systèmes de commande issus de techniques de l'Intelligence Artificielle.

[75] La surveillance est une tâche continue et en temps réel, de détermination de l'état d'un système. Elle consiste en l'enregistrement de l'information ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication de comportements anormaux (défauts).

[76] Une défaillance ou panne est une interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opération spécifiées.

[77] Imaginer par exemple l'échauffement du cône de la buse en cours de fabrication.

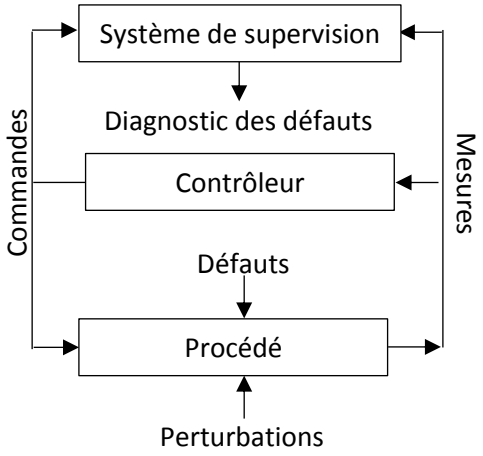


Figure IV.3 – Structure générale d'une application technique de supervision

Pour le cas spécifique des procédés de projection laser, *le niveau de supervision est très important dans la mesure où ces procédés sont en général très complexes et ils sont soumis à diverses instabilités et perturbations* (Voir chapitre I, §I.4.2). Il faut bien faire fonctionner l'ensemble comme un tout cohérent. La cohabitation dans un même procédé d'opérations de différentes natures, au sens de la Figure IV.3, complique bien évidemment le développement des fonctions de supervision. En effet, les perturbations, considérées aussi comme entrées inconnues différentes des défauts, influencent également le processus surveillé. *L'une des difficultés majeures auxquelles le système de supervision est confronté consiste à discriminer l'influence des perturbations de celle des défauts du processus. De plus, le système étant bouclé au moyen de la loi de commande, certains défauts ont tendance à être masqués ou atténués par cette loi de commande et leur détection peut être alors rendue difficile*.

Le nombre important de publications concernant les techniques de supervision montre l'intérêt porté à ces méthodes d'assurance qualité [17]. Si un certain nombre de capteurs sont testés (dans différentes configurations), les travaux ne présentent souvent qu'une recherche par tâtonnement des corrélations signaux/défaut (variations de l'amplitude du signal, fréquences caractéristiques de la transformée de Fourier,…etc). *Les techniques de supervision ont aussi conduit à quelques réalisations, mais une grande partie de leurs succès provient de l'absence de bouclage direct sur le procédé (le système fonctionne en boucle ouverte*). On peut retrouver dans [24] une étude intéressante sur la surveillance en temps réel et l'optimisation du procédé de rechargement laser par vision. On trouve également dans [17] quelques exemples d'application des techniques issues de l'Intelligence Artificielle (la logique floue et les réseaux de neurones) comme des outils d'aide à la décision pour la supervision et le diagnostic des procédés laser.

Cette approche d'intégration des outils de surveillance, de diagnostic et d'aide à la décision au niveau de la supervision est pertinente dans les procédés de projection laser en complément de systèmes primaires de commande en boucle fermée. Cette approche intégrée de la supervision est un domaine de recherche actif, mais en même temps très vaste, nous allons simplement citer ici quelques axes de travaux et perspectives intéressantes qui pourraient être appliquées à notre procédé :

- déterminer comment représenter la connaissance du comportement normal du système ;
- définir les variables potentiellement pertinentes du système à observer ;
- décrire la procédure permettant de détecter les causes de défaillance du procédé (par des capteurs, ou des combinaisons de capteurs et de traitement des données), les évolutions de comportements anormaux (apparition d'un défaut par exemple), la localisation et l'occurrence de ces évolutions ;

- Maintenance : Visualisation des états des appareils, fonction de maintenance préventive à court terme, durées,…etc ;
- Conduite du procédé : Fonctions de type dialogue opérateur, visualisation, animation d'écran, tracé de courbes, suivi de fabrication, historique, …..etc ;
- finalement la procédure permettant le diagnostic et la prise de décision, à savoir : quel est le défaut présent, proposer des actions correctives et des fonctions qui renseignent l'opérateur sur les défauts ou alarmes (avertissement, mémorisation)

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéressons à la commande du procédé de projection laser en boucle fermée équipé d'un système de vision et d'un certain nombre d'actionneurs. Les observations sont typiquement les dimensions du bain (signaux de sortie des caméras), tandis que la commande du système est dérivée des entrées de celui-ci en combinaison avec son modèle mathématique d'où l'expression : commande à base de modèles. Nous suggérons au lecteur intéressé au concept de la supervision et du diagnostic des procédés laser, de se reporter à l'ouvrage [17] (en particulier au chapitre 12 et les références incluses, consacré aux outils d'aide au diagnostic et détection de pannes), pour un traitement approfondi sur le sujet.

IV.3 Stratégie adoptée

La section précédente a été consacrée à l'étude bibliographique des techniques de contrôle/commande des procédés de projection laser. Cette étude bibliographique fait paraître clairement que, du point de vue de l'automaticien, *le procédé DMD mène à de nombreux problèmes pratiques, qui sont également liés à des problématiques de fonctionnement du procédé comme* :

- La prise en compte des limitations des actionneurs (saturations) et des non stationnarité ;
- La propriété de fournir des algorithmes de commande tolérants aux fautes (exemple : mauvais positionnement de la pièce, décentrage de la buse, etc), et capables d'assurer un certain niveau de performance ;
- La synthèse de contrôleurs multivariables (le procédé DMD étant composé d'une multitude d'actionneurs et de capteurs) ;
- L'analyse et la garantie de performance et de robustesse en présence d'incertitudes (sur les mesures et sur les modèles) ;
- L'évaluation et même la définition des objectifs de performances (en effet dans le procédé DMD, ceux-ci sont amenés à changer en fonction des matériaux et de la stratégie de construction de la pièce au cours du temps).

Dans ce cadre, le formalisme de la *commande dite robuste*, fournit des outils de développement intéressants pour le contrôle des systèmes multivariables, comme le procédé de projection laser. Grâce à des approches permettant de définir des propriétés fréquentielles (comme les critères de performance H_∞), il est alors possible de synthétiser des contrôleurs pilotant tous les actionneurs disponibles et supervisant la dynamique globale du procédé tout en garantissant certaines propriétés de robustesse en présence de perturbations et d'incertitudes sur les paramètres du modèle. De plus, grâce aux récents développements dans le domaine de la Programmation Semi-Définie (SDP), les Inégalités Linéaires Matricielles (LMI) sont devenues un outil central dans la théorie de la commande des systèmes dynamiques, permettant de traiter et de résoudre une large variété de problèmes [106]. Parmi ces problèmes, l'extension de la commande robuste aux systèmes dits *Linéaires à Paramètres Variants (LPV) ou multi modèle* [1], *permettant notamment de prendre en compte des incertitudes et d'étendre le domaine de validité des modèles linéaires , nous permet de synthétiser des contrôleurs à gains séquencés (gain scheduling) prenant en compte les non linéarités du modèle et de faire varier les performances du système bouclé en fonction de l'état du procédé, permettant ainsi d'atteindre des performances adaptatives sur l'ensemble du domaine de fonctionnement du procédé.*

C'est justement cette capacité de corriger la désadaptation modèle procédé avec la puissance de la commande basée sur des modèles linéaires, qui nous a motivés pour explorer cette dernière approche dans notre travail. De plus, il présente l'avantage de prendre en compte les différentes interactions existantes au niveau du procédé. En particulier, nous développerons une proposition pour la commande robuste basée sur des multi modèles. *A notre connaissance et jusqu'à l'instant présent aucun travail comparable n'a été réalisé sur la commande robuste multi modèles du procédé de projection laser.*

IV.4 Rappel sur la commande robuste

Historiquement, les techniques de la commande robuste multivariable, développées depuis les années 1980, sont nées d'essais de prise en compte a priori d'objectifs de robustesse lors de la synthèse de correcteur. Ces techniques permettent de résoudre de nombreux problèmes de commande avec des temps de développement assez limités [107]. La commande robuste prend une place de plus en plus importante parmi les méthodes de calcul de correcteur. Elle a fait ses preuves sur des problèmes réputés difficiles (flexibilités en robotique, système vibratoires, système multivariables couplés, …etc) et est maintenant considérée comme un *standard dans l'aéronautique et dans le spatial* [95] [106]. Sa principale caractéristique est de permettre de modeler différents transferts d'un système asservi, tout en garantissant la stabilité de la boucle fermée. Elle permet également la prise en compte de certains objectifs de robustesse, tels que la garantie de marges de stabilité ou la robustesse aux dynamiques hautes fréquences mal connues ou non modélisées.

L'objectif de cette partie est de donner une vue d'ensemble de la commande robuste. Il ne s'agit pas là d'une description exhaustive, d'autant plus qu'on se limite à la commande H_∞ qui est ensuite appliquée dans le cadre de nos travaux. Pour plus d'informations, sur le commande robuste, les ouvrages [108] [109] [110] [111] sont particulièrement intéressants.

IV.4.1 Le problème $\boldsymbol{H_\infty}$ standard

Les approches modernes de la commande multivariable s'appuient sur des schémas de synthèse standards. Ces schémas introduits par J.Doyle [111], ont l'intérêt de regrouper les deux problèmes classiques de l'automatique sous une forme unique : *le suivi de consigne et le rejet de perturbation*, pour une multitude de configurations possibles. Les techniques de synthèse proposées dans ce cadre standard peuvent s'appliquer à de nombreuses situations. Elles permettent de synthétiser des lois de commande multivariable de manière quasiment aussi simple qu'en monovariable.

Considérons le système linéaire multivariable $G(s)$ disposant de deux canaux de signaux :

- *le canal de performance* ou d'incertitude : le vecteur w représente les entrées extérieures (telles que les signaux de référence, les perturbations, les bruits) et les signaux z sont choisis pour caractériser le bon fonctionnement de l'asservissement,
- *le canal de commande* : le vecteur u représente les commandes; et y les mesures disponibles pour élaborer la commande.

Sous sa forme la plus simple, *le problème H_∞ est un problème de réjection de perturbation. Il consiste à minimiser l'effet d'une perturbation w sur le comportement du système. Notons $G_{bf}(s)$ le système en boucle fermée entre l'entrée w et la sortie z*. On peut agir sur le système par une commande u et on dispose d'une observation y. Mathématiquement, le problème de la commande peut se définir comme la recherche d'une loi de commande $u = K(s)y$ qui annule, borne ou minimise l'impact de w sur z [110]. On mesurera cet impact par la norme H_∞ du transfert $G_{bf}(s)$[78].

[78] La norme H_∞ d'un système multivariable est son amplification maximale. Pour un système $\mathrm{G(s)}$ telque $\mathrm{y(s) = G(s)u(s)}$, on a $\|\mathrm{G(s)}\|_\infty = \max_{\omega\in\mathcal{R}+}\bar{\sigma}(\mathrm{G(j\omega)})$ où $\bar{\sigma}$ est la plus grande valeur singuliere En

La synthèse H_∞ du correcteur décrit ci-dessus peut se formuler comme suit (Problème H_∞ standard):

1. Etant donné $\gamma > 0$, existe-il un compensateur K(s) telle que :

- Le système bouclé $G_{bf}(s)$ soit asymptotiquement stable (tous les pôles du système en boucle fermée sont à partie réelle strictement négative).
- et assure $\left\|G_{bf}(s)\right\|_\infty < \gamma$

2. Si oui, trouver un compensateur K(s) assurant pour le système en boucle fermée les deux propriétés précédentes.

L'ensemble des compensateurs K(s) assurant la plus petite valeur de γ possible seront dits optimaux. Le minimum est noté γ_{opt} et appelé gain (ou atténuation) H_∞ optimal.

Le théorème du petit gain [108] permet alors d'affirmer que le système présenté sur la Figure IV.4 est stable pour toute incertitude vérifiant $\|\Delta G(s)\|_\infty \leq \frac{1}{\gamma}$. C'est pour cette propriété que la commande H_∞ est qualifiée de robuste : il est possible de synthétiser un correcteur stabilisant le *système incertain* entre des dynamiques connues du modèle nominal G(s) et une partie incertaine bornée[79] (perturbation) $\Delta G(s)$.

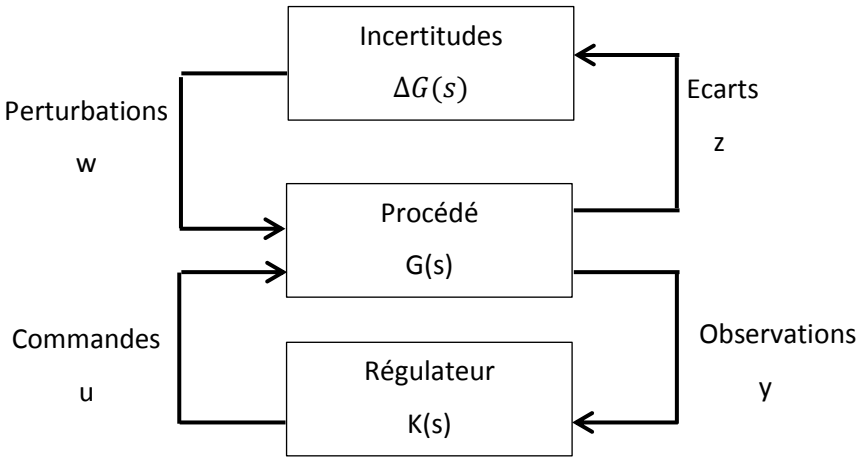


Figure IV.4 – Modèle standard avec incertitude

IV.4.2 Stabilisation et performance robustes

Une autre approche permettant de prendre en compte le caractère non linéaire et non stationnaire d'un système physique et de modéliser les incertitudes qui l'affectent, qu'elles soient structurées (variations paramétriques du système) ou non structurées (dynamique négligées, perturbation extérieurs,….etc). La robustesse consiste à assurer que le système conserve certaines de ses qualités face à ces incertitudes.

En analyse de robustesse, on s'intéresse d'abord à la stabilité du système pour l'ensemble des valeurs des incertitudes à considérer. On parle alors de robustesse en stabilité ou de *stabilité robuste*. On peut également aller plus loin et analyser si le système incertain satisfait un critère de performance pour l'ensemble des incertitudes. On parle alors de robustesse en performance ou de performance robuste. Ces analyses peuvent être menées à deux niveaux :

---

monovariable, on a $\bar{\sigma}(G(j\omega)) = |G(j\omega)|$ et $\|G(s)\|_\infty = \max_{\omega\in\mathcal{R}+}|G(j\omega)|$ est le gain maximal de la réponse fréquentielle $G(j\omega)$ sur l'ensemble des fréquences.

[79] On dispose en général d'une estimation de l'amplitude maximale de $\Delta G(j\omega)$ dans chaque bande de fréquence. Typiquement, cette amplitude est faible aux basses fréquences et croît rapidement dans les hautes fréquences où les dynamiques négligées deviennent prépondérantes.

- on peut se limiter à la question de savoir si le critère de performance est satisfait par l'ensemble des incertitudes prévues. Le résultat d'un tel test est binaire.
- On peut aussi chercher à connaître la dilatation que l'on peut appliquer au domaine de variation des paramètres pour amener le système en limite de robustesse. Notons ρ^* le coefficient de dilatation[80] maximal obtenu. Le système est robuste si $\rho^* > 1$.

Les tests de robustesse aboutissent généralement à une valeur approchée de ρ^* soit par excès, soit par défaut. Les approches aboutissant à une valeur par défaut de *la marge de robustesse* sont qualifiées de pessimistes et permettent d'obtenir une borne supérieure de la marge de robustesse. Les méthodes aboutissant à une valeur par excès sont qualifiées d'optimistes et permettent principalement d'évaluer le pessimisme des premières méthodes (borne inférieure de la marge de robustesse). Ces approches traités par les méthodes de type µ-analyse, s'appuient sur la notion de valeur singulière structurée (Structured Singular Values : SSV) [111]. Cette notion est une extension de la valeur singulière qui permet de prendre en compte la structure des incertitudes. De nombreux algorithmes[81] ont été développés pour le calcul de bornes inférieures et supérieures de la marge de robustesse, certains ayant l'avantage d'avoir un temps de calcul qui évolue de manière polynomiale et non exponentielle en fonction de la complexité du problème [108].

IV.5 Application de la commande H_∞ sur le procédé

Après avoir présenté la synthèse H_∞, nous allons dans cette section appliquer cette technique de commande sur le procédé de projection laser afin de synthétiser une loi de commande pour réguler la géométrie du bain. La première partie est dédiée à une commande en puissance de la largeur du bain autour d'un point de fonctionnement. Cette commande est comparée avec la commande en boucle ouverte pour mettre en évidence les avantages de cette solution, notamment en efficacité de réglage et en robustesse. Les problèmes liés à l'implantation pratique de la commande sont également analysés (saturation des actionneurs, les ON/OFF laser …). La deuxième partie est dédiée à la commande en vitesse de la hauteur du bain et en troisième partie nous présentons l'extension de la commande à plusieurs points de fonctionnement via la technique de commande en gain scheduling. Et nous terminons par une implémentation d'une commande multivariable (Puissance-Largeur et Vitesse-Hauteur).

IV.5.1 Commande de la largeur du bain

On a choisi comme première application, la commande robuste de la largeur du bain. Cette dernière est considérée comme l'actionneur de référence (notamment pour la simplicité de sa mise en œuvre). Le schéma fonctionnel correspondant à la commande en puissance de la largeur est présenté en Figure IV.5. Les essais de commande de la largeur du bain ont été effectués sur un substrat de même nature que le matériau projeté, c'est-à-dire en TA6V.

[80] Appelé également marge de robustesse

[81] La plupart de ces algorithmes sont implémentés dans les toolbox µ-Analysis and synthesis toolbox et robust control toolbox de MATLAB.

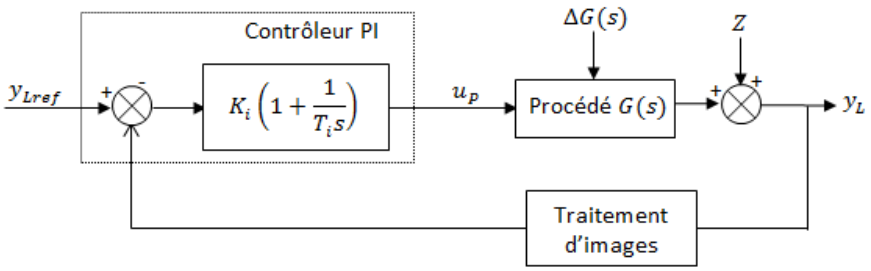


Figure IV.5 – Schéma bloc de la commande de la largeur du bain

Z représente les perturbations affectant la mesure y_L (telles que les perturbations non mesurables, modifications des conditions d'interactions laser/matière, ….), $G(s)$ la fonction de transfert identifié dans le chapitre précèdent avec les incertitudes sur les paramètres du modèle représenter par $\Delta G(s)$ u_P la commande en puissance et y_L la largeur mesurée du bain liquide en sortie de la caméra coaxiale.

Rappelons que les algorithmes de traitement d'image permettent de calculer les dimensions du bain (ici la largeur). La méthode classiquement retenue fait appel à des techniques simples permettant un faible temps de calcul compatible avec les contraintes temps-réel. Elle se décompose en trois étapes: Acquisition-Prétraitement-Segmentation (Voir Chapitre II). Ces traitements sont effectués sur une portion limitée de l'image, ce qui permet de limiter les temps de calcul. Dans le travail présenté ici, nous avons travaillé sur des images de taille 400 x 400 pixels avec un temps d'exposition de 4ms. Les images sont envoyés au PC par l'intermédiaire d'une liaison série CameraLink à 200 Mbits/s afin de minimiser les délais.

Dans le cadre de ce travail, on a choisi d'utiliser des méthodes de synthèses H_∞structurée en nous appuyant sur les travaux de [112], nous utiliserons les outils associés disponible dans la Robust Control Toolbox [106].

Pour annuler tout écart statique en régime permanant, on a choisi un *contrôleur PI* (voir son expression sur la Figure IV.5). Ce type de régulation est souvent réalisé et ce d'autant plus que des régulateurs simples robustes et fiables existent et sont largement utilisés dans le monde industriel [113].

La synthèse de correcteur structurée est en général un problème d'optimisation non convexe et NP-difficile. Les outils de synthèse *hinfstruct et looptune* de la Robust Control Toolbox a alors recours à l'optimisation non lisse venant ajuster de manière itérative les gains du contrôleur afin de stabiliser internement le système en boucle fermée et de minimiser des contraintes H_∞ . Nous ne rentrons pas dans les détails, le lecteur pourra se référer à [112] pour les aspects théoriques et à [114] pour l'utilisation pratique.

Nous avons utilisé le potentiel de ces outils dans le cadre applicatif de nos travaux pour calculer les gains de notre correcteur (le gain proportionnel (K_i) et intégral (T_i)). Le cahier de *charges de la synthèse est* :

- annulation de l'erreur statique en suivi de consigne de la largeur,
- roll-off maximal (atténuation des hautes fréquences des signaux de commande),
- temps de réponse aussi faible que possible,
- marge de module > 0.5,
- rejet efficace des perturbations.

Du point de vue pratique, nous avons développé et implémenté le contrôleur avec ses caméras et actionneurs (commande en puissance[82]) dans l'environnement MATLAB/Simulink. Le respect des temps de traitement d'image et de calcul de la commande est garanti par le noyau temps réel de MATLAB (Voir chapitre II). Par ailleurs, afin de pouvoir utiliser le contrôleur sur le noyau temps réel de MATLAB (ou embarquer ce dernier sur une cible distante temps réel du type XPC Target), une génération automatique du code doit être effectuée à partir de Simulink. Cette opération peut être faite de façon très simple grâce à des boites à outils complémentaires de Mathworks telles que SIMINLIK CODER et XPC Target. La période d'échantillonnage en boucle fermée est de 50Hz[83].

IV.5.1.1 Les ON/OFF laser – Controleur anti-Windup

En pratique, *la puissance laser doit être limitée pour des raisons de sécurité*. En effet, le laser a une tension d'entrée maximale de ±20V qui ne doit pas être dépassée, sinon il est physiquement détérioré. Limiter la puissance dans le laser revient à limiter la tension d'entrée.

Dans la réalité, le schéma-bloc initialement présenté sur la Figure IV.5 doit ainsi être modifié en saturant la sortie du correcteur, comme suit :

$$u_p = \begin{cases} u_{pmax} & pour & u_i \geq u_{pmax} \\ u_i & pour & u_{pmin} \leq u_i \leq u_{pmax} \\ u_{pmin} & pour & u_i \leq u_{pmin} \end{cases} \quad \text{(IV.1)}$$

Cette limitation d'amplitude (*saturation*) conduit à l'emballement de la commande lors des ON/OFF laser. Ce phénomène d'emballement de la commande (appelé *windup*) peut conduire à une instabilité du système. L'origine de ce phénomène est le fait que la commande calculée par le correcteur est différente de celle appliquée réellement au système. Ainsi, le contrôleur continue à intégrer l'erreur et à fournir une grande valeur de commande malgré le fait que cette commande dépasse la limitation. Le résultat est l'apparition de phénomènes oscillatoires très marqués ou, parfois, de réponses divergentes. Si le terme intégral n'est pas limité, sa valeur devient très grande et il faut, à l'entrée du correcteur, une erreur fortement négative et du temps pour revenir à la valeur finale.

Dans notre application, une *stratégie anti-windup* proposée par [113] a été mis en place pour limiter la sortie du correcteur (et de son terme intégral). Le principe de la méthode est décrit sur la Figure IV.6. Comme on peut l'observer, l'effet du dispositif est inexistant lorsqu'il n'y a pas de limitation, i.e. lorsque e_s =0. Quand l'actionneur sature, le signal en rétroaction essaye de ramener l'erreur e_s à zéro en recalculant l'intégral de telle sorte que la sortie du contrôleur soit à la limite de saturation. Le comportement dynamique de ce dispositif définit la vitesse à laquelle le signal e_s est annulée, et peut être déterminé en calculant la valeur de $1/T_t$.

[82] La commande en puissance passe par l'entrée analogique AE-CW (Voir chapitre 2).

[83] Dans le précédent chapitre nous avons montré à travers les résultats d'identification que les principales fréquences de coupures du procédé en boucle ouverte étaient entre 6 et 25 Hz pour tous les points de fonctionnement. Cette raison a motivé de travailler avec les fréquences de 50 Hz, soit une fréquence double de la fréquence max. Des fréquences supérieures à 50Hz présentaient des problèmes d'instabilité de buffers dans MATLAB.

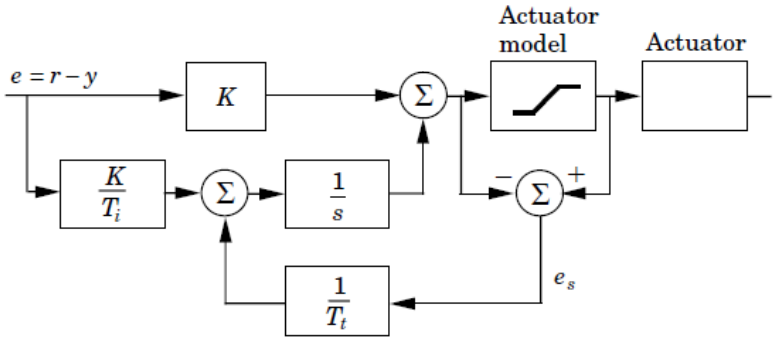


Figure IV.6 – Dispositif anti-wind-up [113]

On peut également réduire les effets indésirables de la limitation du signal de commande en cessant d'intégrer des que la limitation entre en action. Cette manière de faire est d'autant plus facilement mise en œuvre que le régulateur est implanté sous forme numérique et permet également d'atténuer les effets de la décélération des moteurs à la fin de chaque cordon.

IV.5.1.2 Contrôle de la largeur sur un mur

La commande de la largeur a été testée en premier lieu sur un mur. Cela permet en effet, de valider le contrôleur et de valider ses performances couche par couche. Cette géométrie permet aussi de réaliser les échantillons nécessaires à l'analyse métallurgique. De plus cette géométrie est couramment utilisée pour qualifier les nouveaux matériaux en industrie. Cela nous permet donc de faire facilement des comparaisons avec des pièces réalisées en milieu industriel sans contrôle procédé.

Un échantillon de mur de 20 couches construit sans contrôle de procédé, avec une puissance constante (de 400W) est représenté sur la Figure IV.7 (figure du haut). On peut observer en l'absence de contrôle de procédé, une augmentation progressive de la largeur du bain (le bas du mur est plus étroit que la partie supérieure), comme le montre la photo. Cette irrégularité dans la fabrication du mur, résulte du pompage thermique du substrat. En effet, au début de la construction de mur, la forte dissipation de la chaleur par conduction via le substrat, perturbe la fabrication, en provoquant des variations de chaleur qui se répercutent sur la quantité de matière fusionnée et provoque un bain plus étroit. Au fur et à mesure que les couches se succèdent et se trouve éloignées du substrat, il y'a moins de conduction de la chaleur, et le bain s'élargit jusqu'à ce qu'il atteigne une nouvelle valeur d'équilibre (régime quasi-stationnaire). Le problème de de propagation de la chaleur et la non stationnarité est naturellement posé, dans le cadre de l'automatique, comme un problème de rejet de perturbation dans le domaine fréquentiel et plus précisément dans les basses fréquences (phénomène du type thermique). Le rôle du système de commande en boucle fermée est donc de compenser cette variation de chaleur et permet d'obtenir un aspect du mur très appréciable.

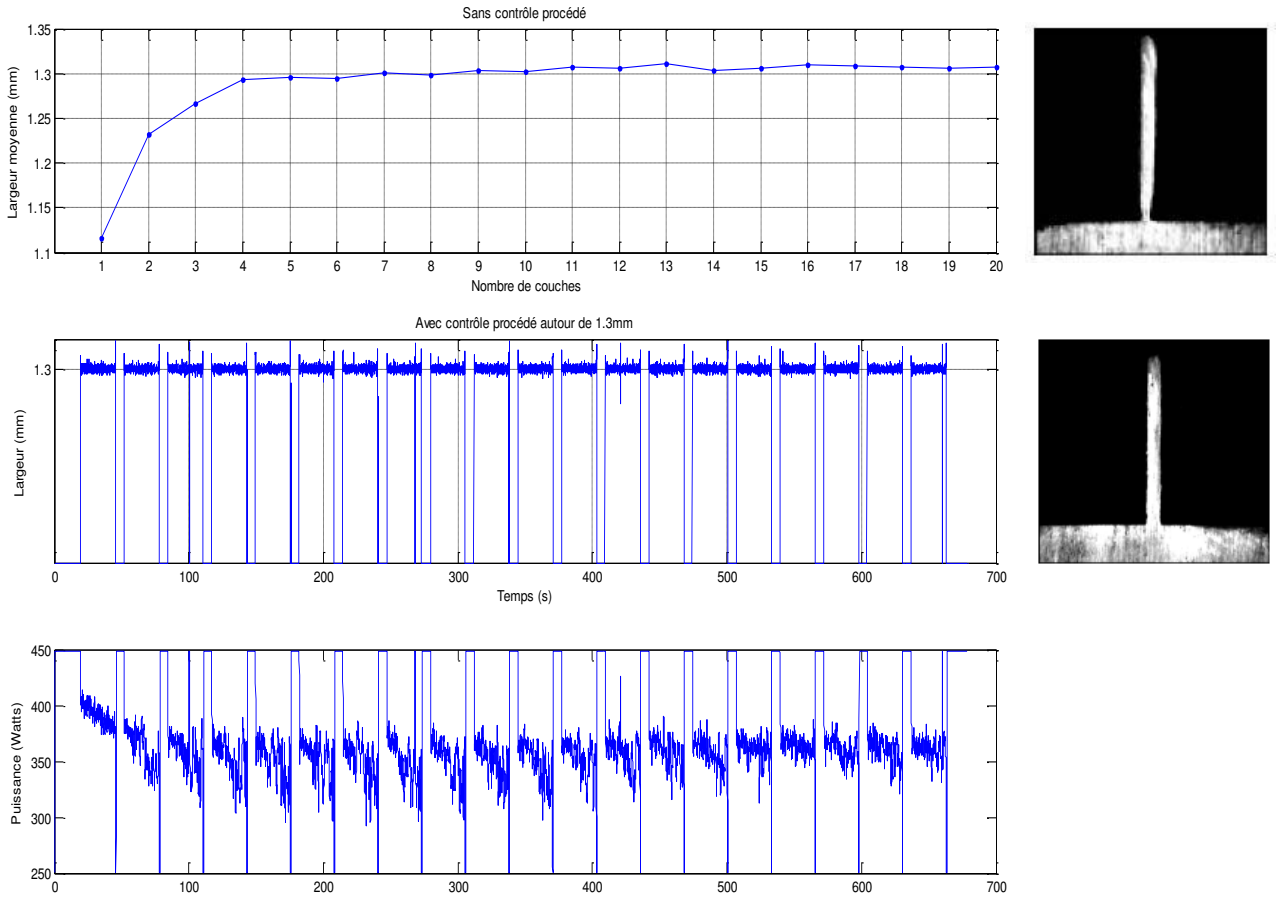


Figure IV.7 – Contrôle de la largeur sur un mur de 20 couches.

Comme on peut le voir sur la Figure IV.7, la fabrication du mur avec contrôle procédé permet de gérer le pompage thermique du substrat qui impose une puissance supérieure à la valeur normale au début de la construction du mur. En effet, le correcteur ne réagit pas de la même sorte quand il se trouve proche ou éloigné du substrat. Au début de construction, la largeur du bain est petite, le contrôleur a tendance à fournir plus de puissance pour compenser la forte dissipation de la chaleur par conduction via le substrat et ainsi atteindre la largeur prédéfinie. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne du substrat, le procédé va voir sa puissance diminuer et retourner à son niveau normal. Grâce au système de commande, la taille du bain est maintenue à peu près constante, entraînant la largeur de cordon constante sur tout le mur (voir photo). On constate également, un aspect plus lisse sur le mur fabriqué avec régulation de puissance, témoin d'une meilleure stabilité du bain.

IV.5.1.3 Robustesse en suivi de trajectoire

Nous proposons dans cette section de tester le contrôleur en suivi de trajectoire composée de deux paliers de consigne. Les résultats sont présentés sur la Figure IV.8. Au début, le procédé est initialisé à un point d'équilibre avec la consigne à 1.4mm, puis à t=30s, la consigne passe à 1.2mm.

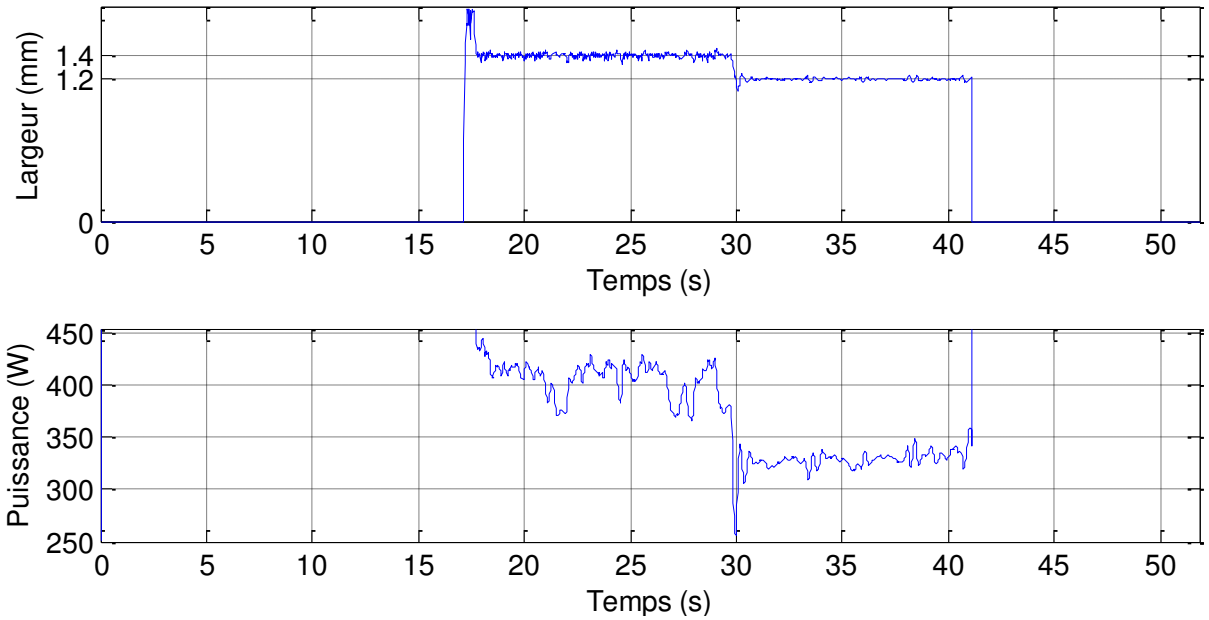


Figure IV.8 – Suivi de trajectoire

Cette figure nous montre que la commande du correcteur prend en compte les variations de consigne pour imposer le comportement désiré au procédé (avec une bonne précisons) et offre un comportement rapide et stable. Dans ces conditions, la trajectoire présentée à la Figure IV.8 est la trajectoire qu'on trouve par exemple quand on fait des contours et remplissage des pièces. La robustesse représente la capacité de la commande à garder ces trajectoires.

Nous notons la présence d'une bosse (dépassement) au début de construction. Celui-ci est inévitable lorsqu'il y a des temps de pause (temporisations)[84]. Notons également que notre dispositif n'est pas équipé pour stopper l'alimentation de la poudre pendant cette temporisation.

IV.5.1.4 Rejet de perturbations

Cette section s'intéresse à la robustesse du contrôleur et à ses performances en rejet de perturbations additives agissant sur la vitesse. Il s'agit d'un cas très courant lors de la fabrication de pièces. La vitesse de déplacement peut changer. C'est le cas par exemple, lors de fabrications de plusieurs pièces avec différentes vitesses ou lors de l'accélération ou la décélération de la commande numérique.

L'expérience se déroule en deux étapes : Étape 1 : le procédé est à son d'état d'équilibre. Étape 2 : nous avons appliqué une perturbation additive constante, en diminuant la vitesse de 480mm/min à 192 mm/min. Soit une diminution de 60%, ce qui correspond à une modification importante des caractéristiques physiques du procédé et surtout de sa fonction de transfert. Le but est de maintenir la largeur du bain autour de la largeur désirée (la consigne), malgré les problèmes apportés. Les résultats sont présentés sur la Figure IV.9.

[84] Le temps de pause est un délai qui espace la fin du dépôt de la couche (n) du début du dépôt de la couche (n+1). Il peut aussi correspondre au temps nécessaire pour replacer la buse dans sa position initiale mais le but de ce temps de pause est surtout de permettre à la chaleur de diffuser dans le substrat afin d'éviter de repasser sur une surface proche de la température de fusion. Le risque serait alors l'écroulement du bain du fait de son volume trop important.

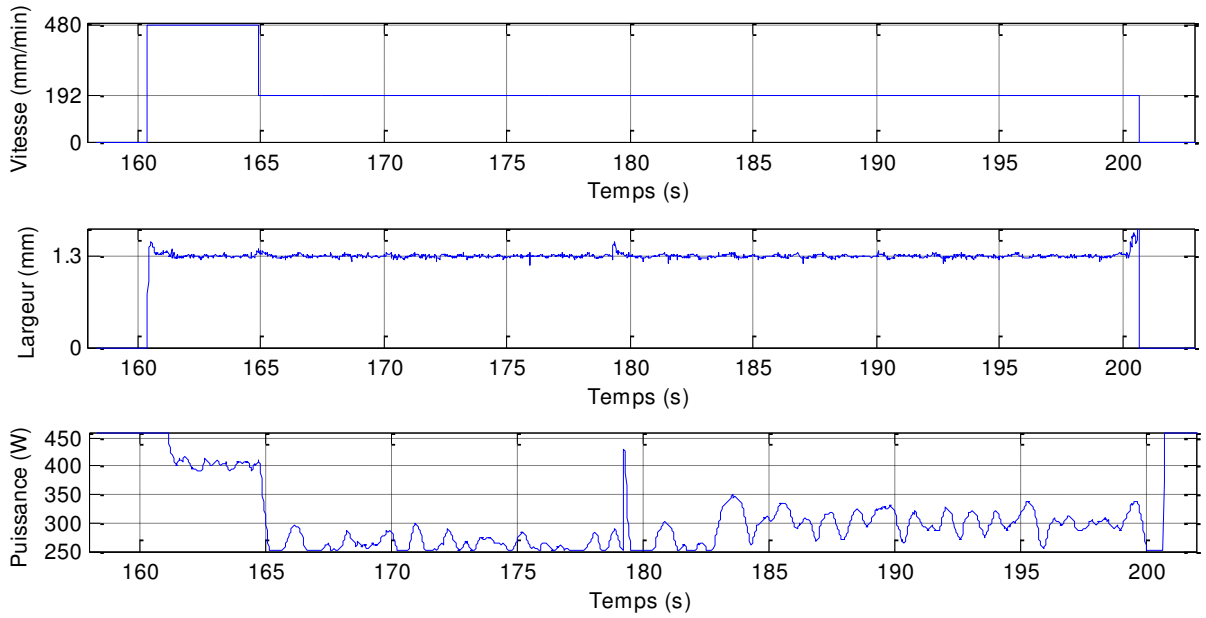


Figure IV.9 – Rejet de perturbation

La Figure IV.9 montre l'évolution de la largeur du bain et la commande en réponses à une perturbation en vitesse à t=165s. Après la diminution de la vitesse à t=165s, le temps d'interaction du laser diminue faisant augmenter la largeur du bain. Le contrôleur diminue la puissance laser pour éviter une largeur du bain trop grande par rapport à la largeur désirée. Cet exemple nous permet de mettre en évidence la capacité d'adaptation du système de commande. Ces résultats sont très similaires à ceux constatés en suivi de trajectoire, le contrôleur prend en compte les variations et amène la sortie rapidement à sa consigne et confirme donc l'efficacité de la commande.

IV.5.1.5 Correction des effets des défauts géométriques de la pièce

D'autres tests ont mis en évidence le fait que les effets de perturbations, dus à un défaut de positionnement du substrat ou des changements dans la géométrie de la pièce sont détectables par le correcteur. Ces changements peuvent être des variations des dimensions ou des trous dans la pièce à traiter. Ce type de problèmes se rencontre dans des pièces mécaniques réelles telles que les arbres à cames.

La figure suivante montre le résultat de notre correcteur, lors de fabrication de pièces présentant des défauts géométriques. Les défauts géométriques sont des discontinuités sur le substrat. Ils imposent une désadaptation de la distance de travail. Les défocalisations poudre et laser vont également varier, entrainant une modification de leur diamètre au niveau de la surface de travail.

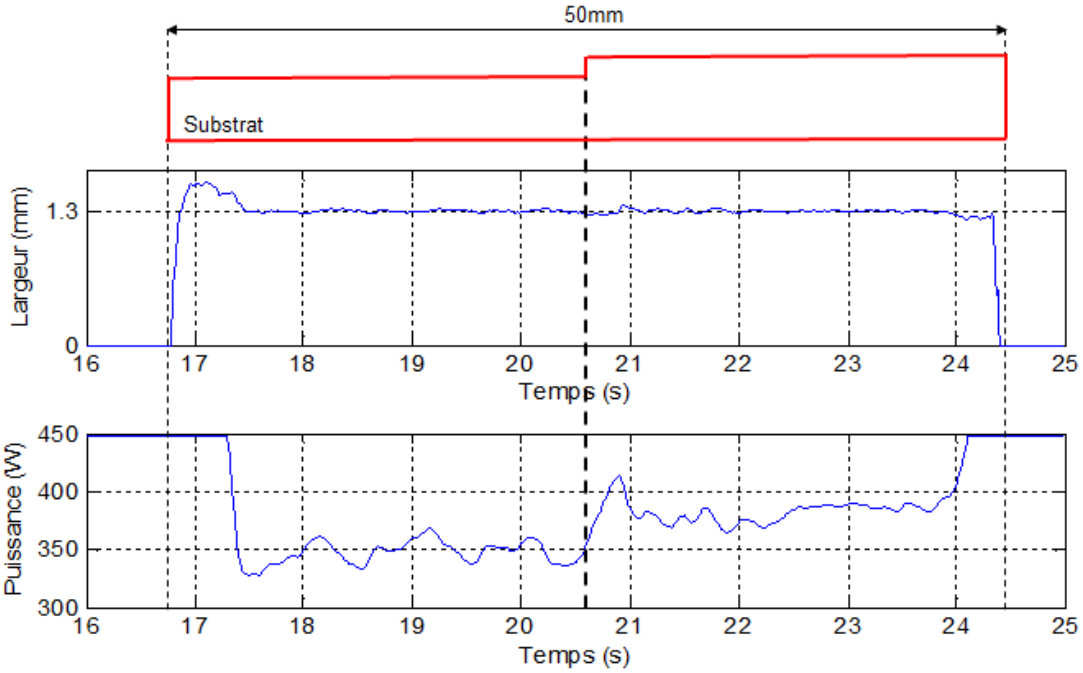


Figure IV.10 – Effets de perturbations dans la géométrie de la pièce.

On constate sur la Figure IV.10 une diminution de la largeur du bain compensé par une augmentation de puissance. Ceci s'explique par le fait qu'à l'endroit du défaut, on s'approche de la buse faisant diminuer ainsi le diamètre du faisceau laser et poudre. La quantité de poudre admise dans le bain est donc plus petite et la largeur du bain s'en trouve diminuée. Notre correcteur est bien optimisé pour ce type de défaut et on constate qu'il n'est pas complétement perturbé face aux défauts géométriques de la pièce.

IV.5.1.6 Correction des effets des défauts de positionnement du substrat

On retrouve les mêmes résultats que précédemment, dans un défaut de positionnement du substrat : le substrat était incliné par rapport à la tête laser, ce qui implique une variation du point focale poudre et laser ainsi que de la distance de travail.

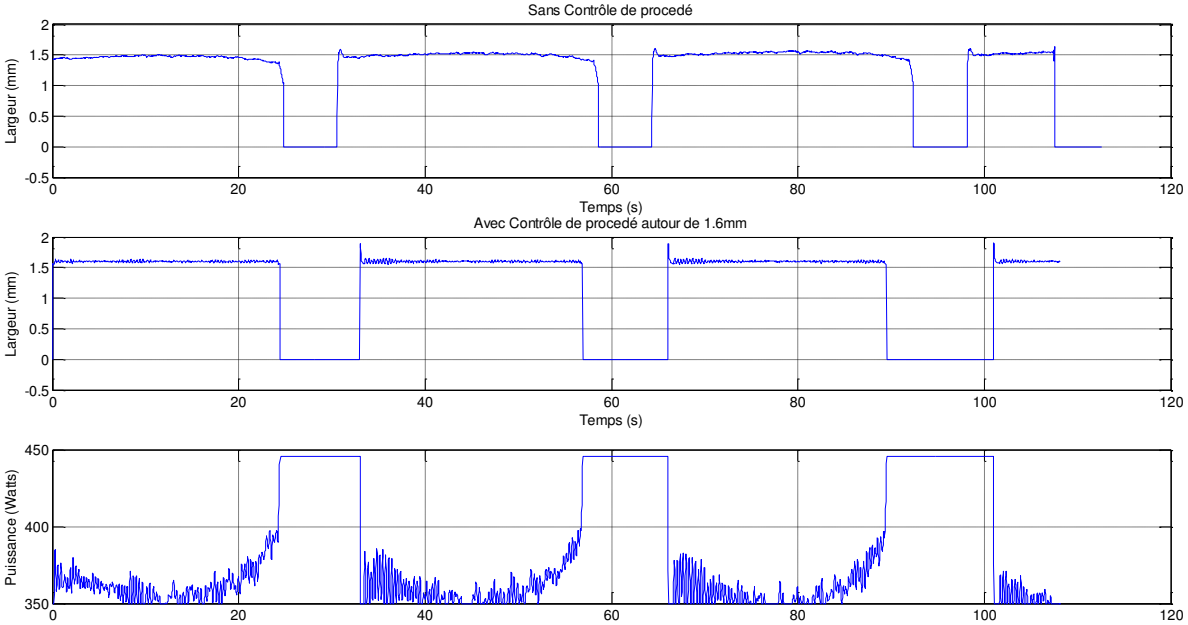


Figure IV.11 – Effet d'un défaut de positionnement du substrat

On voit bien sur la Figure IV.11 qu'à la fin du cordon, le correcteur fournit plus de puissance pour corriger cet écart de positionnement et stabiliser la largeur autour de la valeur désirée.

IV.5.1.7 Correction des effets des défauts de centrage de la buse

Nous avons également testé notre correcteur sur le contrôle de la largeur dans la construction d'un carré sur un substrat plat (pièce plane).

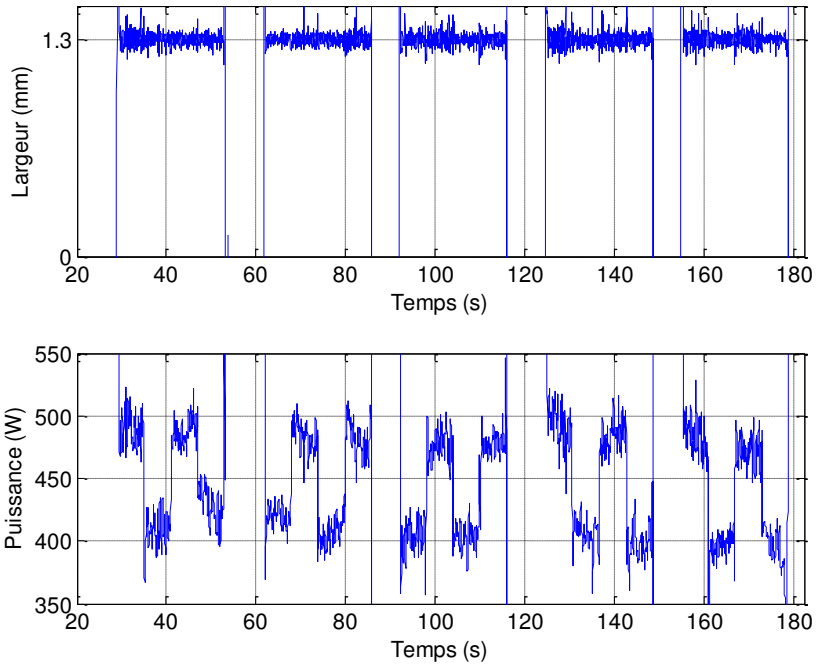


Figure IV.12 – Effets du pompage sur le contrôle procédé

Cette figure nous montre que la commande du correcteur prend en compte le problème de la propagation de la chaleur sur un substrat plat pour imposer la largeur désirée au procédé avec une bonne précision. Cette figure nous renseigne aussi que les points focaux poudre et laser ne sont pas alignés (défaut de centrage de la buse).

Ces résultats soulignent combien il serait important d'exprimer l'interaction ou le lien existant entre la commande en boucle fermée du procédé de projection laser et le monitoring de ce dernier. Nous voyons là une possibilité d'exploiter les signaux de commande pour détecter d'éventuels défauts dans le procédé.

IV.5.2 Commande de la hauteur du bain

La commande de la hauteur du bain est plus délicate que celle de la largeur, puisque s'ajoutent des difficultés dues à la mesure et les non linéarités de la hauteur par rapport à la vitesse. Nous proposons dans cette section de réguler la hauteur du bain en le maintenant à une valeur de consigne.

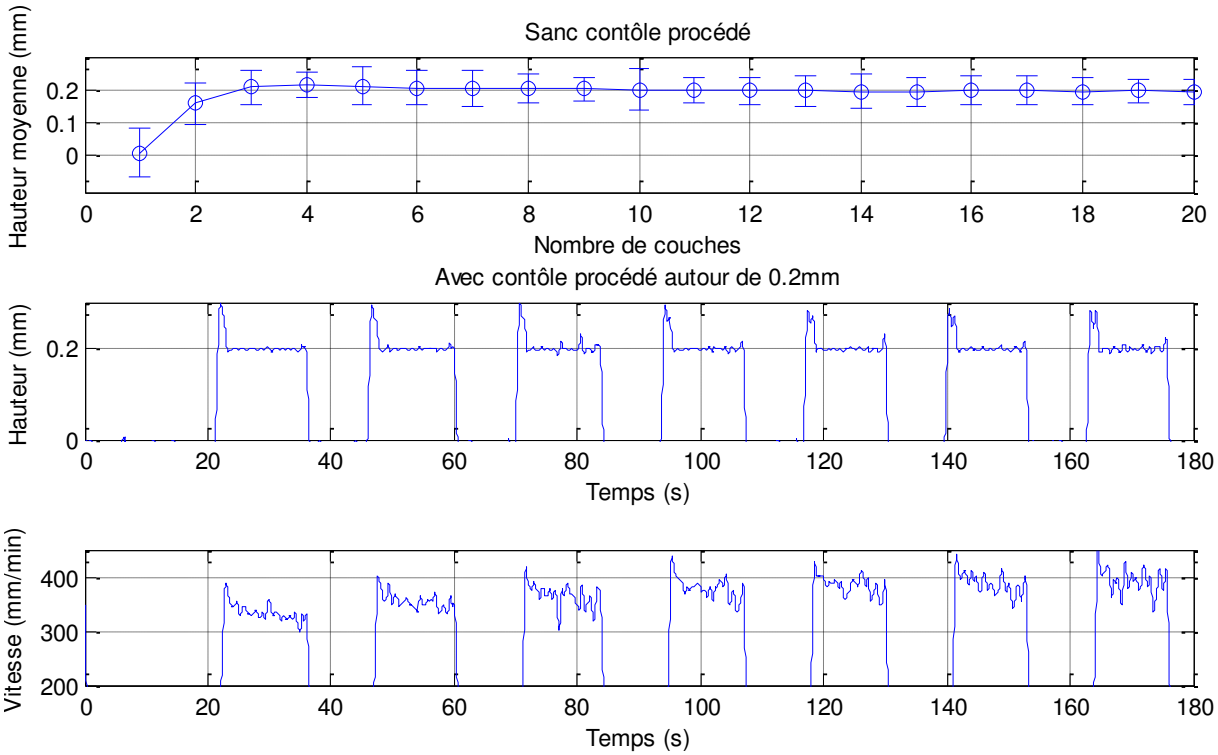


Figure IV.13 – Commande de la hauteur du bain

Un échantillon de mur de 20 couches construit sans contrôle de procédé, avec une vitesse constante (de 400 mm/min) est représenté sur la *Figure IV.13* (figure du haut). On peut observer en l'absence de contrôle de procédé, une augmentation lente de la hauteur du bain.

La fabrication du mur avec contrôle procédé Figure IV.13 (figure du bas), permet de gérer le pompage thermique du substrat qui impose une vitesse inférieure à la valeur normale au début de la construction du mur. En effet, le correcteur ne réagit pas de la même sorte quand il se trouve proche ou éloigné du substrat. Au début de construction, la largeur du bain est petite, le contrôleur a tendance à diminuer la vitesse pour compenser la forte dissipation de la chaleur par conduction via le substrat et ainsi atteindre la largeur prédéfinie. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne du substrat, le procédé va voir sa vitesse augmenter et retourner à son niveau normal. Grâce au système de commande, la hauteur du bain est maintenue à peu près constante.

IV.5.3 Analyse des interactions et commande multivariable

L'analyse des interactions est un préalable à l'élaboration de lois de commande multivariables pour le procédé de projection laser. En effet, dans notre cas, nous avons un système multivariable avec plusieurs sorties (largeur et hauteur du bain) et plusieurs entrées de commande (puissance et vitesse de déplacement). Ces derniers ne se réduisent pas à la mise en parallèle de systèmes monovariables mais se caractérisent par des phénomènes d'interactions (ou de *couplage*). Par conséquent, le phénomène d'interaction est une contrainte qui pose un sérieux problème pour la commande des systèmes multivariables, c'est pourquoi l'analyse des interactions joue un rôle de premier plan lors de la synthèse d'un système de commande multivariable.

IV.5.3.1 Rappel des interactions possibles entrées-sorties

Pour éclaircir les interactions existant dans le procédé de projection laser, considérons le système de la Figure IV.14.

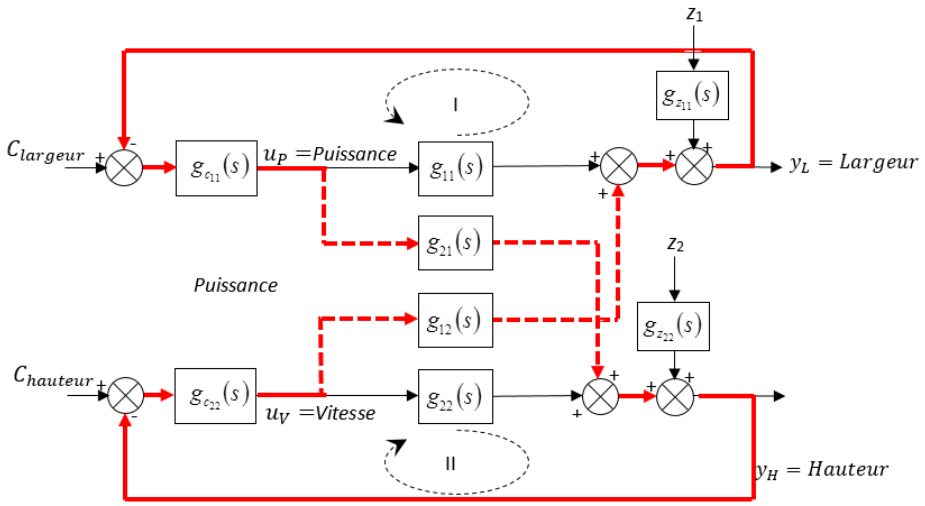


Figure IV.14 – Interactions dans les systèmes multivariables

Lorsque la perturbation z_2 affecte la sortie hauteur (y_H), cette dernière s'écarte de sa valeur de consigne $C_{hauteur}$, le régulateur $g_{c22}(s)$ génère donc une commande en vitesse (u_v) de manière à annuler cet écart (ligne continue). Néanmoins, la commande u_v générée affecte en plus la sortie largeur (y_L) à travers la fonction de transfert $g_{12}(s)$ (ligne discontinue), donc la sortie y_L s'écarte aussi de sa valeur de consigne $C_{largeur}$ Ceci oblige le régulateur $g_{c11}(s)$ à générer une commande en puissance (u_p) pour maintenir la sortie y_L à la position désirée $C_{largeur}$. L'action correctrice du régulateur $g_{c11}(s)$ de la première boucle (I) (la commande en puissance u_p) affecte aussi la sortie y_H à travers la fonction de transfert$g_{21}(s)$. Alors le maintien des sorties y_L et y_H à leurs positions désirées, en dépit de la perturbation z_2 qui doit être annulé par le régulateur$g_{c22}(s)$, est une tâche ardue.

Par cet exemple, *on a montré comment une commande affecte plusieurs sorties et comment une perturbation affectant une sortie se propage dans le système et perturbe d'autres sorties. Cela est dû essentiellement à l'existence des interactions entre les deux boucles (I) et (II) de la configuration de commande.*

Dans ce cas de figure les fonctions de transferts $g_{12}(s)$ et $g_{21}(s)$ sont des fonctions de transfert qui influent sur les performances du système commandé en causant des interactions entre les deux boucles, dont les effets sont considérables sur la robustesse de la stratégie de commande considérée. Par conséquent, l'existence des interactions entre les variables d'entrées-sorties du système est la cause principale pour laquelle la synthèse et le fonctionnement du système, boucle par boucle, sont difficiles car un changement d'une variable d'entrée a pour conséquence des changements de plusieurs variables de sorties ; ce qui rend difficile le maintien des performances de chaque boucle. De plus, les performances d'une boucle de commande peuvent être fortement affectées par les paramètres des régulateurs des autres boucles [115].

Dans le cadre général de la commande des systèmes multivariables une attention considérable a été accordée au concept d'analyse des interactions. Dans cette optique, on cherchera le plus souvent à compenser le système de sorte que :

- Chaque entrée affecte seulement une sortie ;
- La perturbation sur une sortie, les entrées étant nulles, n'affecte que cette seule sortie.

IV.5.3.2 Méthodes d'analyse des interactions

Deux grandes classes de méthodes d'analyse des interactions peuvent être définies [116] :

- *Méthodes d'analyse directe* (ou analyse des interactions en boucle ouverte).
- *Méthodes d'analyse indirecte* (ou analyse des interactions en boucle fermée).

Les méthodes de la première classe sont basées sur l'utilisation directe du modèle du système. Ces méthodes permettent de déterminer directement la meilleure configuration de commande. Cette classe se divise en deux types de méthodes :

- Méthodes utilisant la matrice de transfert du système.
- Méthodes utilisant la représentation d'état du système.

Dans cette thèse nous avons utilisé les méthodes d'analyse directe utilisant la matrice de transfert du système.

IV.5.3.2.1 Méthode du Quotient d'Interaction (IQ)

On considère que le système est décrit par une matrice de fonction de transfert $G(s)$ comme suit :

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ \vdots \\ y_r(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & \cdots & g_{1m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{r1}(s) & \cdots & g_{rm}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ \vdots \\ u_m(s) \end{bmatrix} \tag{IV.2}$$

Le Quotient d'Interaction est la première méthode d'analyse des interactions proposée par Rijnsdorp pour l'analyse des interactions dans un système multivariable. Rijnsdorp considère un système 2x2 et définit le IQ comme suit [116] :

$$K(s) = \frac{g_{12}(s)g_{21}(s)}{g_{11}(s)g_{22}(s)} \tag{IV.3}$$

L'analyse des interactions repose sur le calcul de la valeur statique de $K(s)$:

$$k_s = \lim_{s \to 0} K(s) \tag{IV.4}$$

En se basant sur la valeur dek_s, les conclusions de Rijnsdorp sur les interactions dans un système 2x2 sont résumées dans le Tableau IV.1

Valeur statique de $K(s)$	Conclusion
k_s >1	Les interactions posent un problème d'instabilité
$k_s \leq -1$ et $\frac{1}{3} \leq k_s \leq 1$	Fortes interactions entre les variables du système
$-1 \leq k_s \leq \frac{1}{3}$	Faibles interactions entre les variables du système

Tableau IV.1 – Interprétation du Quotient d'Interaction (méthode de Rijnsdorp).

L'importance des hautes et moyennes fréquences dans les systèmes a conduit Kominek et Smith à proposer une extension dynamique pour le Quotient d'Interaction, car le IQ de Rijnsdorp néglige ces gammes de fréquences.

La technique de Kominek et Smith consiste à représenter le module de $K(j\omega)$. Le Tableau IV.2 esquisse les cas possibles et leurs interprétations [116].

Module de $K(j\omega)$	Interprétation
$\|K(j\omega)\|$> 1	Les interactions posent un problème d'instabilité
$\|K(j\omega)\|$est proche de 1	Fortes interactions entre les variables du système
$\|K(j\omega)\|$ est proche de 0	Faibles interactions entre les variables du système

Tableau IV.2 – Interprétation du Quotient d'Interaction (méthode de Kominek et Smith).

Notons que le IQ est applicable seulement dans le cas où le système possède le même nombre d'entrées et de sorties ($m = r$) et ne permet pas de déterminer directement la meilleure configuration de commande, mais donne une information sur le niveau d'interaction entre les boucles d'une configuration candidate. Pour déterminer la meilleure configuration, il faut calculer la RGA.

IV.5.3.2.2 Matrice des Gains Relatifs (RGA)

La méthode de la Matrice des Gains Relatifs développée par Bristol, permet de dégager une configuration de commande avec un faible niveau d'interaction. Le calcul de la RGA est basé sur la matrice des gains statiques du système. Chaque élément de la RGA est déterminé par l'expression suivante [117]:

$$\lambda_{ij} = \frac{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{u_k=0,k\neq j}}{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{y_k=0,k\neq i}} \qquad \text{(IV.5)}$$

Le numérateur représente le gain statique en boucle ouverte entre u_j et y_i, et le dénominateur est le gain statique entre u_j et y_i lorsque les autres sorties sont contrôlées par des correcteurs parfaits (gain en boucle fermée). Le gain relatif λ_{ij} indique si le gain d'une boucle ouverte [u_j , y_i] change lorsque toutes les autres boucles sont fermées.

IV.5.3.2.2.1 Calcul de la Matrice des Gains Relatifs (RGA)

La Matrice des Gains Relatifs se calcule directement en utilisant la matrice des gains statiques K_s comme suit :

$$RGA = K_s .* \left[{K_s}^{-1}\right]^T \qquad \text{(IV.6)}$$

avec :

$$RGA = \left[\lambda_{ij} : i,j = 1,\dots,m\right] \qquad \text{(IV.7)}$$

$$K_s = \left[K_{sij} : i,j = 1,\dots,m\right] \qquad \text{(IV.8)}$$

Où :

$.*$: est le produit de Hadamard[85].

K_s : est la matrice des gains statiques.

K_{sij}: est le gain statique entre u_j et y_i

Les éléments de K_s sont déterminés par la relation suivante :

$$K_{sij} = \lim_{s \to 0} g_{ij}(s) \tag{IV.9}$$

IV.5.3.2.2.2 Propriétés de la Matrice des Gains Relatifs (RGA)

- La somme algébrique des éléments de la RGA le long d'une ligne i ou d'une colonne j est égale à 1.

$$\sum_{j=1,\ i=\mathrm{Cst}}^{m} \lambda_{ij} = 1 \quad \text{et} \quad \sum_{i=1,\ j=\mathrm{Cst}}^{m} \lambda_{ij} = 1 \tag{IV.10}$$

- Pour un élément $K_{s_{ij}}$ nul, le gain relatif λ_{ij} correspondant est nul.
- La relation entre IQ et la RGA est :

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{1 - \dfrac{g_{12}(0)\, g_{21}(0)}{g_{11}(0)\, g_{22}(0)}} \tag{IV.11}$$

Pour un système à deux entrées et deux sorties, on a :

$$\lambda_{11} = \lambda_{22} = \lambda \quad \text{et} \quad \lambda_{12} = \lambda_{21} = 1 - \lambda \tag{IV.12}$$

$$RGA = \begin{bmatrix} \lambda & 1-\lambda \\ 1-\lambda & \lambda \end{bmatrix} \tag{IV.13}$$

IV.5.3.2.2.3 Interprétation de la Matrice des Gains Relatifs (RGA) et choix de la configuration de commande

- Si les éléments de la diagonale de la RGA (λ_{ij} : $i = j$) sont *proches de 1*, *alors le niveau d'interaction dans le système est très faible*, dans le cas contraire (inférieur ou supérieur à 1) les interactions sont fortes.
- Pour $\lambda_{ij} = 1$, la réponse pour le couple entrée-sortie [$u_j - y_i$] quand toutes les autres boucles sont ouvertes ou fermées sera la même, c'est-à-dire que les autres boucles n'ont pas d'influence sur la boucle [$u_j - y_i$].
- Si λ_{ij} est négatif, la réponse de la boucle correspondante peut changer de sens de variation (système à réponse inverse), si les autres boucles sont fermées. En plus la boucle elle-même peut être instable ou le système global devient instable si jamais la boucle considérée s'ouvre, donc le couple correspondant ne doit pas être choisi dans la configuration de commande.

[85] Pour deux matrices de mêmes dimensions $A, B \in \mathbb{R}^{m \times n}$, le produit de Hadamard est une matrice $A.*B \in \mathbb{R}^{m \times n}$, dont les coefficients sont $(A.*B)_{i,j} = (A)_{i,j} \times (B)_{i,j}$

- *Le choix de la configuration de commande porte sur les couples entrées-sorties ayant un gain relatif λ_{ij} positif proche de 1.*

IV.5.3.3 Identification de la matrice de transfert

Différentes méthodes d'identification permettent d'obtenir la matrice de transfert du système multivariable [92] [118], définie par l'équation (IV.2).

Les méthodes les plus classiques, mais également les plus puissantes ne permettent que d'identifier des modèles monovariables. On peut donc les utiliser pour identifier séparément les quatre fonctions de transferts de $G(s)$. Parmi ces méthodes, on distingue les méthodes présentées au chapitre III, reposant sur un modèle ARX qui identifie simultanément le modèle du système et le modèle du bruit de manière à minimiser le bruit responsable de l'écart entre les données et le modèle. Des méthodes, développées plus récemment, permettent d'identifier directement des modèles multivariables. C'est le cas notamment des méthodes des sous-espaces [96].

Un modèle simple destiné à la synthèse d'une loi de commande a été identifié. Il s'agit d'un modèle ARX du premier ordre (voir chapitre 3). Les quatre fonctions de transfert sont identifiées séparément. Le signal d'excitation est un signal SBPA, constitué de la concaténation de créneaux d'amplitudes et de durées aléatoires. Ce signal est ensuite appliqué sur la commande en puissance et en vitesse (u_P et u_V) autour du point de fonctionnement P400V400Dm1. Pour chaque entrée de commande, la largeur et la hauteur du bain (y_L et y_H) sont acquises pour modéliser ensuite indépendamment chaque fonction de transfert :

$$\begin{bmatrix} y_L \\ y_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_P \\ u_V \end{bmatrix} \tag{IV.14}$$

Avec

$$G(s) = \begin{bmatrix} \dfrac{1.915}{0.07392\,\mathrm{s} + 1} & \dfrac{-0.248}{0.325\,\mathrm{s} + 1} \\ 0.000046 & \dfrac{-0.1192}{0.1126\,\mathrm{s} + 1} \end{bmatrix}$$

Une vue globale des résultats d'identification de la matrice de transfert $G(s)$ obtenue montre que la commande en vitesse agit pratiquement sur l'ensemble des variables de sortie (largeur et hauteur) via les fonction de transfert $g_{12}(s)$ et $g_{22}(s)$. Concernant la puissance, on constate qu'elle a un effet limité voire nul sur la hauteur (le terme constant dans la fonction de transfert $g_{21}(s)$). On observe également que la fonction de transfert $g_{11}(s)$ (Puissance-Largeur) à un temps de réponse (tr =221.76 ms) plus faible par rapport à la fonction de transfert $g_{22}(s)$ (Vitesse-Hauteur)(tr =337.8 ms). D'un point de vue de commande, la puissance présente l'avantage d'agir d'une manière instantanée lors de la commande contrairement à la vitesse qui présente une réponse lente.

La réponse du modèle et la réponse du procédé à une excitation successive en puissance et en vitesse sont comparées sur la Figure IV.15. On observe que le modèle suit de manière assez précise les mesures et reproduit bien le comportement du procédé.

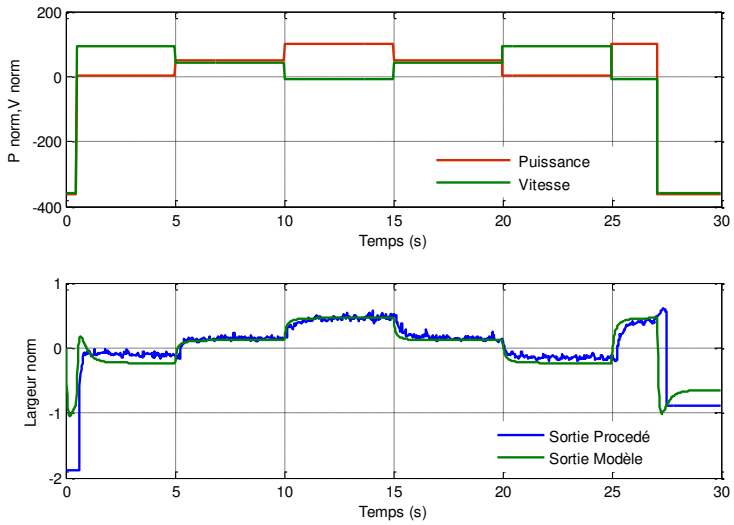


Figure IV.15 – Réponse expérimentale du procédé et du modèle identifié de $G(s)$

IV.5.3.4 Analyse des interactions

Pour analyser les interactions existant dans le procédé de projection laser, nous avons commencé par identifier les différentes fonctions de transfert entre les divers couples entrée-sortie$[u_j, y_i]$.

Nous utilisons le Quotient d'Interaction (IQ) et la Matrice des Gains Relatifs (RGA). Celles-ci permettent de conclure sur les interactions entre les variables :

k_s = 4.995x10^{-5}

$$RGA \cong \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

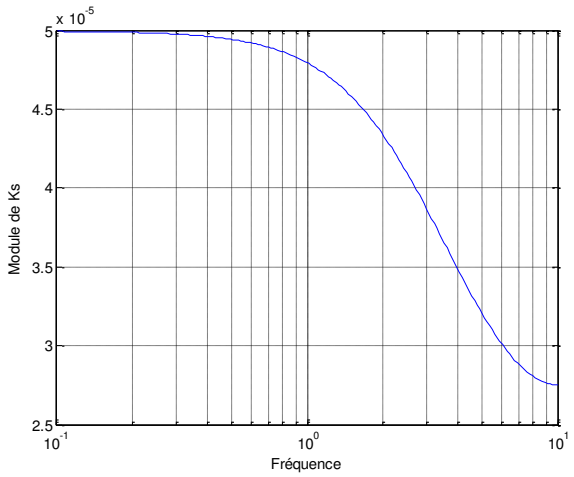


Figure IV.16 – Quotients d'Interaction (méthode de Kominek et Smith)

La Figure IV.16 montre que module de $K(j\omega)$ est proche de zéro, les interactions dans le système sont donc négligeables. Résultat confirmé par le Quotient d'Interaction (méthode de Rijnsdorp). Les éléments de la matrice RGA trouvée montre qu'un découplage en deux chaines SISO est possible et la paire « variable d'entrée – variable de sortie » la mieux adaptée pour l'élaboration de la loi de commande est $[u_P, y_L]$ et $[u_V, y_H]$.

Grâce à ces conclusions et au modèle trouvé par identification, une loi de commande multi variables et multi boucles peut être développée, ce qui fait l'objet de la section suivante.

IV.5.3.5 Application et résultats

L'objectif de cette partie est la synthèse d'une loi de commande multivariable permettant le maintien de la largeur et de la hauteur autour de leurs valeurs désirées. L'enjeu de ce contrôle est d'obtenir des épaisseurs de couches régulières et d'être constamment au plus proche du dessin technique.

Sur la base de la matrice de transfert identifiée précédemment, une synthèse d'une loi de commande multivariable inspirée de [112] et [119] a été faite de manière à atteindre la bande passante la plus élevée possible tout en assurant les critères de robustesse (marge de module, roll-off). La méthode envisagée est la commande H_∞ multiboucle décentralisée. La première boucle lie la puissance à la largeur, tandis que la deuxième boucle lie la vitesse à la hauteur. L'objectif de la synthèse du contrôleur consiste à calculer les gains des contrôleurs PI (Proportionnel-Intégral) pour chacune des chaînes SISO et en cascade sur chacune des chaînes. C'est l'approche la plus intuitive et la plus simple à embarquer sur un calculateur.

Les figures suivantes montrent la réponse indicielle du système à des commandes en puissance et en vitesse.

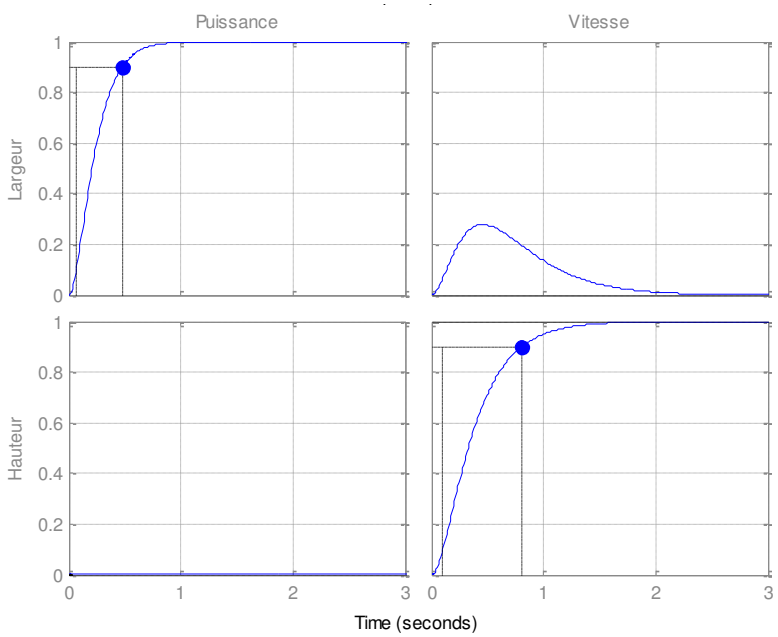


Figure IV.17 – Réponse indicielle du procédé obtenue avec la commande H_∞

Pour la stratégie de commande considérée, on constate que chaque régulateur assure parfaitement la poursuite des consignes avec des temps de réponse très faibles pour les deux sorties. Nous avons montré lors des différentes analyses réalisées que la vitesse affecte la largeur et la hauteur du bain. Cette figure met en évidence l'apport du correcteur du point de vue interactions entre les boucles. D'après les résultats de simulation, le correcteur a permis de réaliser un bon découplage en réduisant l'effet de la vitesse sur la largeur et d'éliminer l'effet de la puissance sur la hauteur.

L'avantage de la loi de commande que nous avons élaborée se manifeste par le fait qu'elle se base sur la matrice de transfert identifiée précédemment incluant les différentes variables d'entrée et de sortie du procédé avec une prise en compte des interactions existant entre elles. En effet, les différentes lois de commande trouvées dans la littérature utilisent essentiellement des méthodes très simplistes. Ces méthodes sont généralement de type SISO (mono-entrée, mono-sortie) impliquant une représentation très limitée du procédé. Les lois de commande issues de ces méthodes ont une validité sur un domaine de fonctionnement très restreint.

IV.5.4 Vers la commande multi modèles – gain scheduling

Les méthodes proposées pour l'identification et la commande du procédé de projection laser s'appuient sur un modèle linéaire. Ce modèle est valable autour d'une configuration nominale, ce qui correspond bien à l'application du procédé travaillant autour d'un point de fonctionnement fixe où la zone de fonctionnement est réduite. Il est cependant connu que notre procédé à un comportement non linéaire, ce qui fait que cette méthode verra ses performances se détériorer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la configuration nominale (instabilité, oscillations voir divergence du système). Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à *l'évaluation d'un domaine de travail où la stabilité et certaines performances restent garanties*. Précisons que les méthodes présentées sont relativement élémentaires et constituent une première réponse au problème. *Une solution plus globale basée sur l'utilisation des modèles LPV (Linéaires à Paramètres Variant) via une technique du gain scheduling* [107] *reste privilégiée pour étendre le fonctionnement du contrôleur sur toute l'enveloppe de conditions opératoires désirée.*

IV.5.4.1 Robustesse aux variations de paramètres et analyse du domaine de stabilité

Il a été montré que le contrôle procédé est fortement touché par les variations de procédé, de température par couche ou de perturbations qui font varier les paramètres du système à plusieurs endroits dans la boucle. Il vient naturellement d'étudier la robustesse du contrôleur en fonction de ces variations et d'évaluer le domaine de stabilité du système asservi autour de la configuration nominale.

Les résultats d'identification de la partie III.5.4 a montré que la réponse du procédé n'est pas linéaire. En effet, les paramètres du modelé identifié du procédé θ (le gain statique (K) et la constante du temps (τ)) ne sont pas constants et peuvent varier en fonction des paramètres (puissance et/ou vitesse). Cette caractéristique est aussi propre à celle de la construction d'une pièce de plusieurs couches dans laquelle la thermique du procédé change au fur et à mesure de l'élévation de la pièce (Cf. §III.6). Mais dans tous les cas, cette variation des paramètres du modèle identifié peut être interprétée comme des paramètres nominaux θ_{0m} auquel s'ajoute une variation d'amplitude maximale plus ou moins, appelé incertitudes. Cette caractéristique est donc bornée par une valeur minimale θ_{0min} et une valeur maximale θ_{0max}.

L'étude présentée dans cette partie s'appuie sur les résultats obtenus pour une variation de ±50% sur les valeurs moyenne des paramètres du modelé identifié, autour des points de fonctionnement V400P[600-900]Dm1 (voir Tableau1-Chapitre 3) :

$$0.5 \cdot \tau_{nominale} = 0.0303 \leq \tau \leq 1.5 \cdot \tau_{nominale} = 0.0910$$
$$0.5 \cdot K_{nominale} = 0.5850 \leq K \leq 1.5 \cdot K_{nominale} = 1.7550$$

Sur la Figure IV.18 sont tracés les pôles du système bouclée pour différentes valeurs de paramètres K et τ. On remarque que les parties réelles sont toujours négatives, ce qu'implique que le système est robustement stable. Notons, qu'Il s'agit d'une condition nécessaire et non suffisante car on n'explore qu'une partie de paramètres.

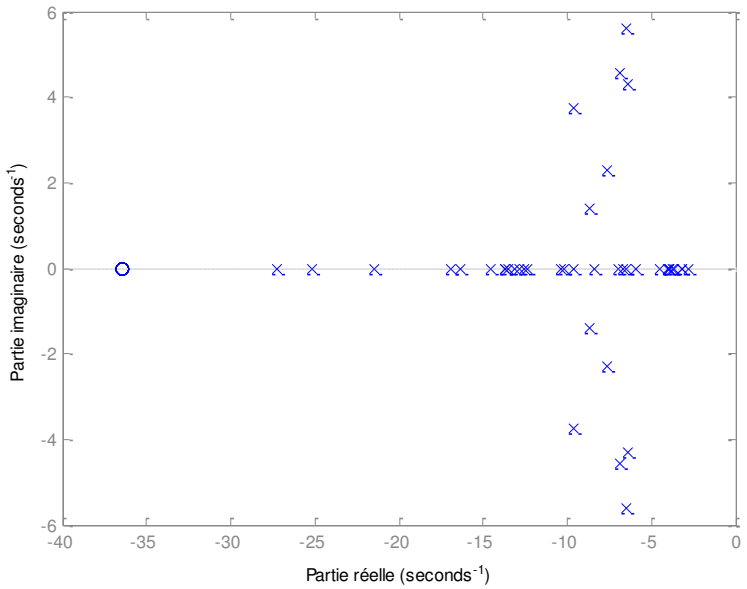


Figure IV.18 – Les pôles du système

En s'appuyant sur les fonctions de la boite à outils Robust Control toolbox de MATLAB [106].La marge de robustesse $\rho^* = 2$ a été obtenue (Cf. IV.4.1). *Cela correspond à dire que le domaine sur lequel le système est prouvé comme étant stable correspond à 200 % du domaine nominal*. Sur la figure suivante sont représentés un échantillon de 20 courbes obtenues par un tirage aléatoire des paramètres K et τ sur le domaine nominal de fonctionnement. Le dépassement maximal observé est de 0.926%.

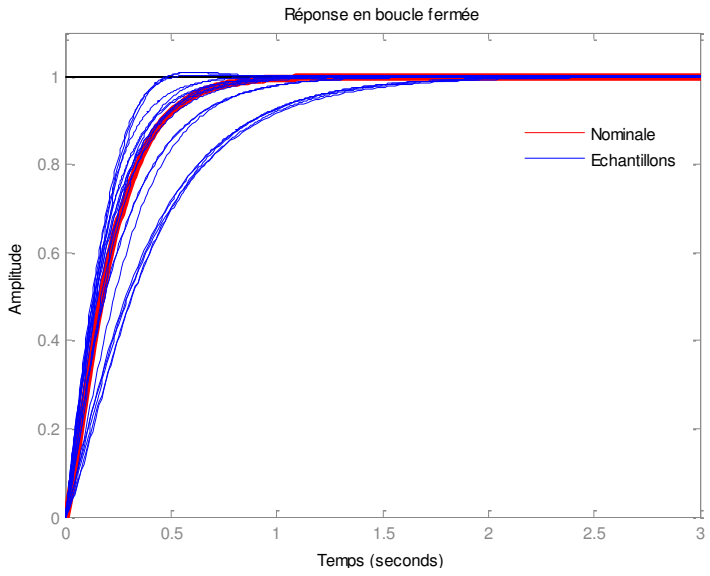


Figure IV.19 – La réponse en largeur 0ù=)du procédé en boucle fermée

L'étude en simulation a permis de mieux évaluer la méthode proposée. L'évaluation de ces résultats montre que les performances du procédé sont préservées dans le domaine nominal de fonctionnement. Le dépassement maximal observé est de 0.926%. Cela peut s'avérer suffisant pour des applications où des performances importantes sont nécessaires uniquement sur un espace de travail limité.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la méthode de synthèse H_∞ a été utilisée pour le calcul des lois de commande afin d'améliorer la qualité de la pièce fabriquée par le procédé de projection laser. Dans la synthèse de cette loi de commande, les variations des paramètres du système ont été pris en compte. Une analyse de stabilité a été faite pour étudier l'influence de ces variations sur le système en boucle fermée. La loi de commande a été validées aussi bien expérimentalement qu'en simulation grâce au modèle identifié dans le chapitre III.

L'application de cette commande au procédé de projection laser, nous a permis de valider la stratégie de commande développée en termes de suivi de consigne, de rejet de perturbations et de robustesse. On peut constater que la largeur et la hauteur ont bien été régulée autour de la valeur désirée. Nous croyons que les résultats obtenus sont intéressants, compte tenu du fait que la synthèse proposée du contrôleur basé sur des modèles linéaires locaux est méthodique et simple.

Conclusions et perspectives

Cette thèse applicative s'inscrit dans le cadre d'un projet ambitieux labellisé FALAFEL, qui a pour but de développer un système de commande temps réel, permettant d'obtenir et de maintenir une haute qualité de la pièce fabriquée en matériaux métalliques en TA6V. Ce qui nécessite de munir le procédé par des capteurs capables de fournir des informations utiles pour suivre l'évolution des paramètres procédés et en particulier les signaux caractéristiques produits par le bain liquide (qui est notre outil de construction de la géométrie de la pièce). Ces signaux sont le reflet de certaines propriétés du bain liquide et après solidification du cordon de matière. Ces mesures sont utilisées ensuite pour d'une part, identifier des modèles mathématiques (dans une perspective de commande) et d'autre part contrôler le procédé en temps réel.

Le domaine du contrôle procédé de projection laser est un domaine vaste et multidisciplinaire, où se croisent et interagissent plusieurs disciplines, allant de la science des matériaux, à l'automatique, en passant par la technologie capteur jusqu'au traitement du signal. Ainsi, une étude bibliographique a été présentée au chapitre 1. Dans ce chapitre nous avons présenté d'abord les aspects fondamentaux sur les procédés DMD en insistant sur les paramètres entrées/sorties du procédé, puis nous nous sommes focalisés sur la nécessité du contrôle de procédé et la contribution que l'automatique peut apporter aux procédés de projection laser. Nous avons positionné la problématique générale de l'automatique, en remarquant deux défis majeurs, qui sont la construction d'observateur permettant de connaître la qualité de la pièce lors de la fabrication (propriétés métallurgiques et mécaniques) et la difficulté liée à la modélisation numérique de ces systèmes. Dans cette étude, nous avons également défini les étapes et la méthodologie conduisant au contrôle procédé (Cf. Figure I.1).

L'analyse bibliographique du deuxième chapitre a permis de présenter les capteurs permettant le contrôle du procédé de projection laser. Cette étude a permis de situer les grandeurs physiques caractéristiques importantes à contrôler et dont dépend la qualité des pièces fabriquées. Ainsi, on distingue les observables liés à l'information de température et les observables lié aux géométries du bain. Des capteurs à base de caméras ont ainsi été retenus, permettant de récupérer les signaux caractéristiques produits par le bain, et qui sont le reflet de certaines propriétés du bain liquide et après solidification du cordon de matière. En effet, cette étude a montré l'émergence et l'intérêt porté à la vision passive associée aux algorithmes de traitement d'image pour le contrôle qualité et la commande des procédés lasers. Suite à cette étude, nous avons également développé les solutions retenues pour la réalisation des mesures expérimentales essentielles à nos travaux, qui sont les observables liés aux géométries du bain. Une chaine complète d'acquisition et de traitement de données pour l'étude du système en boucle ouverte (identification des modèles procédé) mais également en boucle fermée (mise en place d'un dispositif de commande) a été mise en place. Une méthode originale de mesure en Z par triangulation passive a été développée. La méthode repose sur les images fournies par la caméra coaxiale et la caméra latérale. Dans les différentes applications réalisées au cours de ce chapitre, les algorithmes de traitement d'image utilisés ont permis de fournir des résultats convaincants et d'assurer différentes ouvertures.

La modélisation mathématique est un outil indispensable à la représentation de systèmes pour maıtriser (ou optimiser leur fonctionnement) ou comprendre leur évolution. Cette technique de modélisation est constituée de la modélisation théorique (ou analytique) et de la modélisation expérimentale. Les modèles analytiques permettent certes l'analyse de l'évolution des paramètres procédé, néanmoins, ils restent très complexes pour les rendre plus facilement manipulables à des fins de commande en temps réel. Les modèles expérimentaux sont obtenus à partir des mesures (entrées/sorties) sur le système à modéliser, en s'appuyant sur les techniques dites d'identification de systèmes. Elle est donc plus facile à mettre en œuvre et a fait l'objet du deuxième chapitre. La méthode d'identification basée sur l'approche multi modèles a été utilisée. L'approche multi modèle consiste à représenter un système non linéaire complexe par un ensemble de modèles de structures simples dans des zones bien définies. Ces modèles représentent la relation entre l'entrée de commande (puissance/vitesse) et la sortie mesurée par les caméras (largeur/hauteur). Les

caractéristiques dynamiques du procédé ont été analysées, et la corrélation entre la géométrie du bain et les paramètres d'entrée a été établie. Différentes fonctions de transfert du premier, second et troisième ordre ont été testées. L'analyse des résultats a montré que l'usage d'un modèle du premier ordre permet de mieux décrire la dynamique dominante (comportement transitoire) du procédé. De plus, pour consolider le comportement du modèle, des validations expérimentales ont été faites en confrontant le modèle avec les expériences. Les résultats obtenus montrent que le modèle traduit correctement la dynamique du procédé.

Après la mise en place des capteurs et l'identification des modèles, nous entrons dans le dernier chapitre de cette thèse. Le chapitre IV exploite les développements précédents dans l'esprit de l'objectif initial d'amélioration de la qualité de la pièce fabriquée par le procédé de projection laser. Ceci conduit à l'étude consacrée à la commande du procédé de projection laser. Les travaux présentés dans ce chapitre sont focalisés sur la synthèse de la commande dite robuste. L'application de ce type d'approche au procédé de projection laser, nous a permis de résoudre de façon élégante le problème du maintien du procédé dans des conditions opératoires stables et optimales en dépit des effets d'une désadaptation modèle-procédé d'une part et d'une perturbation additive d'autre part. L'invariance d'un comportement donné en présence de ces phénomènes perturbateurs traduit la propriété de robustesse de la commande. Nous croyons que les résultats obtenus sont intéressants, compte tenu du fait que la synthèse proposée du contrôleur basé sur des modèles linéaires locaux est méthodique et simple. De plus, l'obtention du modèle se fait à partir des seules données entrée-sortie du procédé considéré, au moyen des capteurs sans contact à base de caméras. Ce chapitre s'achève par la présentation de deux extensions de notre contrôleur, l'une basée sur l'analyse des interactions pour une commande multivariable et l'autre sur l'utilisation des modèles LPV (Linéaire à Paramètres Variant) via une technique du gain scheduling.

A l'issue de ce travail et vue l'étendue de la problématique, il ne nous a pas été possible de traiter l'ensemble du sujet et il conviendrait de le poursuivre dans différentes directions :

- Dans l'optique de la maitrise du comportement des matériaux pendant la construction de la pièce, du contrôle qualité ou de l'assurance qualité, les capteurs et la modélisation de la thermo-mécano-métallurgie constituent un maillon essentiel, catalyseur de nombreux progrès. Le développement d'un observateur, afin d'estimer les variables non mesurables du système, représente ainsi un axe important de recherche dans ce domaine. Le challenge étant d'implémenter cet aspect observateur (ou modèle de prédiction) lors de la construction des systèmes de commande. À ce stade, le problème ne peut être résolu que par des approches pluridisciplinaires. Le champ des compétences est vaste et une coopération entre les spécialistes du procédé et les automaticiens nous semble une nécessité. Ceci nous amène à définir les deux points clés qui devraient permettre de faire sauter les verrous suscités :
  - Observation : L'utilisation de capteurs à base de caméras (la vision) à fort pouvoir informationnel (mesures spatiales (2D et 3D), temporelles et spectrales), devrait permettre de lever en partie le problème des mesures. En effet, en partant du constat que la connaissance de la température détermine la qualité de la pièce au niveau métallurgique et mécanique, que les caméras thermiques coûtent cher et que les industriels ne sont pas encore prêts à investir dans des équipements coûteux, il devient nécessaire d'utiliser les données issues de ces capteurs à base de caméras pour la mesure de température et des caractéristiques géométriques du bain liquide. L'aspect modélisation prend une place importante dans ce travail. L'objectif étant de relier ces mesures indirectes aux mesures métallurgiques et/ou mécaniques décrites dans les modèles physiques. Afin que les structures des modèles soient le reflet des processus physiques, une approche de connaissance sera toujours préférée aux approches boite noire, et les problèmes d'identifiabilité des paramètres devront être gérés dès la phase de modélisation.
  - Modélisation/Identification : Sur la base des modèles mathématiques et des mesures disponibles, il s'agira alors de développer des observateurs d'état permettant d'estimer les variables non mesurables du système (des mesures virtuelles), pour lesquelles les capteurs en

ligne font défaut, comme c'est typiquement le cas dans le domaine de la métallurgie. De nombreux observateurs d'état ont été proposés dans la littérature, utilisant complètement ou partiellement les modèles (Cf. §III.2.1). Cependant, il reste souvent difficile d'évaluer la qualité des états estimés, qui dépend du degré de confiance dans le modèle, dans les mesures et dans l'absence de perturbations. La prochaine étape serait d'intégrer toutes ces connaissances et les modèles disponibles dans les systèmes CFAO, et sur la base des propriétés désirées de la pièce (la précision géométrique, la résistance mécanique, la finesse de la structure, l'état de surface,….), le système doit être en mesure de sélectionner une combinaison de paramètres optimaux de construction.

- Tout le travail réalisé dans le cadre de cette thèse ne concerne aujourd'hui que le procédé de projection laser. Or, aujourd'hui de plus en plus de projets de fabrication nécessitent l'utilisation de plusieurs procédés fabrication pour arriver à la réalisation de pièces fonctionnelles. L'enjeu devient donc plus important avec l'utilisation optimale de chaque procédé de fabrication. Dans l'avenir, on pourra considérer la généralisation des résultats déjà établis, à d'autres matériaux et/ou d'autres procédés utilisant les lasers. Le système développé a déjà été utilisé et a fonctionné parfaitement, il pourrait facilement être adapté et utilisé directement sur d'autres procédés, en considérant les outils de traitement comme des boîtes noires, exécutant des algorithmes issus du traitement du signal, du traitement d'images, et de l'automatique.
- Etude approfondie des équivalences, au niveau du comportement dynamique, entre la structure des modèles obtenus pour le procédé de projection laser sur le TA6V et d'autres matériaux aéronautiques et/ou d'autres procédés, notamment le frittage laser. A notre connaissance, aucune publication n'a été consacrée à ce sujet. Cette étude s'avérait intéressante afin d'établir des conditions d'équivalence pour arriver à la définition d'un nouveau modèle multi-procédés, formuler de nouvelles conditions d'analyse, ainsi que proposer de nouvelles approches de commande robuste pour la réalisation de pièces multi-procédés.
- Une étude plus poussée des capteurs, semble inévitable et plusieurs voies sont possibles :
  - Les capteurs mis en œuvre peuvent être miniaturisés en utilisant un système de vision avec la technologie embarquée. Avec une solution pareille, les algorithmes de traitement d'image et la commande sont fournis par un seul et même système.
  - Les filtres optiques utilisés pour les caméras sont des paramètres importants, puisque les phénomènes recherchés sont souvent représentés par un spectre précis. Une étude spectroscopique pourrait permettre de déterminer les longueurs d'ondes pertinentes du spectre pour sélectionner des filtres optimaux.
  - L'utilisation des capteurs CMOS dans le proche infrarouge est très intéressante pour une utilisation couplée avec un modèle radiométrique pour l'acquisition des champs de températures du bain liquide. On comprend l'intérêt de telles mesures de champs pour les problématiques procédé comme celle du contrôle de la vitesse de solidification, par exemple.

- La méthode proposée pour l'identification a l'intérêt d'être efficace pour le problème posé et est simple à mettre en œuvre. Cependant, elle ne convient que pour un espace de travail limité. Il serait intéressant d'améliorer cette approche afin d'élargir l'espace de travail accessible avec un plus grand nombre de points de fonctionnement. Une idée consiste à utiliser des méthodes de décomposition basées sur la classification floue (fuzzy clustering (Oliver, 2000)), permettant ainsi de regrouper des données présentant une certaine similarité. Un modèle local (affine) est ensuite élaboré pour chaque groupe de données. Chaque modèle local tente alors de représenter le système dans un domaine de fonctionnement bien défini. Le modèle global du système est obtenu par une combinaison des modèles locaux. Une étude complémentaire consistera à parfaire ces modèles en y incluant des paramètres gouvernant des phénomènes thermiques, car ils dominent fortement l'évolution de différents paramètres du modèle global.
- Les techniques de commande, que nous avons présentées, sont basées sur un correcteur linéaire. Naturellement, leur domaine de stabilité dans l'espace de travail se trouve réduit. Il importe donc de développer des méthodologies de synthèse de correcteurs permettant à la fois de maîtriser les dynamiques et d'obtenir de bonnes performances sur un domaine de travail assez important. Les méthodes de synthèse LPV pourraient apporter des réponses intéressantes à ces problèmes.
- En ce qui concerne la commande du procédé par le débit de poudre qui engendre des retards dans la chaîne d'acquisition, on pourra envisager de le modéliser en vue de leur prise en compte dans les lois de commande. Un point de départ de cette étude pourra être trouvé dans [12]
- Implémenter d'autres techniques de commande, en particulier de commande prédictive sur la vitesse, est particulièrement prometteur en raison des nouvelles fonctionnalités et d'informations accessibles telles que la position de la buse obtenue grâce au système de commande numérique ou l'étude de la trajectographie par exemple.
- Une extension directe des travaux décrits au chapitre IV pourrait être d'utiliser des techniques issues de l'Intelligence Artificielle (la logique floue et/ou les réseaux de neurones) dans les procédés de projection laser, le futur est très prometteur car d'un côté ça permet d'adjoindre aux procédés des fonctions intelligentes pour rendre leur fonctionnement optimal, sûr et reproductible, afin de les exploiter au mieux et de l'autre des nouvelles fonctionnalités et outils sont attendus comme l'aide à la décision, la surveillance et le diagnostic. Cependant, il est certain que l'intégration de ces outils en complément de systèmes primaires de commande en boucle fermée aurait pu motiver plusieurs thèses à elle seule. Toutefois, les résultats obtenus dans ce travail de thèse n'ont fait que marquer quelques pas en avant et ont permis de défricher plusieurs domaines pour d'abord initier le concept, puis pour tracer pour les années à venir, le travail à accomplir. Dans la même direction et sur du long terme, les dernières avancées de l'architecture de l'interface MATLAB/Simulink avec la Toolbox Simscape, nous permettent d'avoir plus d'intelligence au niveau de la machine et donc d'intégrer des modules de simulation de la fabrication (Simulateurs). Ainsi des travaux pourront être conduits pour importer les fichiers CAO de la pièce et envisager d'implanter nos schémas de commande d'une manière autonome et robuste dans un environnement virtuel, visualisation 3D et disposition des pièces dans l'espace machine, visualisation de la trajectoire en temps réel, interaction dynamique avec le logiciel de tranchage (slicing), réglage et visualisation en temps réel des paramètres procédés. La tâche n'est pas facile, mais le défi est tentant !

□□□

Bibliographie

[1] A.Longuet, C.Colin, P.Peyre, S.Quilici and G.Cailletaud, "Modélisation de la fabrication directe de pièces par projection laser : application au Ti-6Al-4V," Conférence Matériaux, Dijon, France, 13-17 November 2006.

[2] P. Aubry, "Projet PROFIL : Note Technique," GERAILP, ARCUEIL, 2006.

[3] J. Maisonneuve, C. Collin, Y. Bienvenu and P. Aubry, "Fabrication directe de pièces bonne matière avionnables en TA6V par projection laser," Conférence Matériaux, Dijon, France, 13-17 Novembre 2006.

[4] M. Schneider, "Laser cladding with powder : Effect of some machining parameters on clad properties," University of Twente, Enschede,The Netherlands, 1998.

[5] J. Maisonneuve, "Fabrication directe de pièces aéronautiques en TA6V et en IN718 : Projection laser et fusion sélective par laser," Thèse Centre des Matériaux – Ecole des Mines de Paris, 2008.

[6] M. Ghabri, "Etats de surface de pièces métalliques obtenues en fabrication directe par projection laser : compréhension physique et voies d'amelioration," Thèse Arts et Métiers ParisTech, Centre de Paris, 2013.

[7] S. Morville, "Modélisation numérique du procédé de fabrication directe par projection laser," UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD, 2012.

[8] S. Yuwen and H. Mingzhong , "Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V lasercladding using Nd:YAG laser," *Optics and Lasers in Engineering,* p. v.50 pp.985–995, 2012.

[9] U. de Oliveira, V. Ocelık and J. T. Hosson, "Analysis of coaxial laser cladding processing conditions," *Surface & Coatings Technology,* no. 197, pp. 127-136, 2005.

[10] J. T. Hofman, D. F. de Lange, B. Pathiraj and J. Meijer, "FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding," *Journal of Materials Processing Technology,* p. v211 pp.187–196, 2011.

[11] M. Bamberger, W. D. Kaplan, B. Medres and L. Shepeleva, "Calculation of process parameters for laser alloying and cladding," *Journalof Laser Applications,* vol. 10, no. 1, pp. 29-33, 1998.

[12] P. Aubry, M. Guiraud and R. Fabro, "PROCESS CONTROL ON LASER CLADDING FOR DIRECT MANUFACTURING : CONTROL OF THE WIDTH AND HEIGHT OF THE DEPOSITED MATERIAL BY COAXIAL VISION," *ICALEO 2008, Congress Proceeding,Paper #103,* 2008.

[13] E. Toyserkani, A. Khajepour and S. F. Corbin, Laser cladding, CRC Press, 2004.

[14] Z. Kai, P. Deepankar and S. Brent, "A review of thermal analysis methods in Laser Sintering and Selective Laser Melting," *Solid Freeform Fabrication Symposium,* p. 796, 2012.

[15] I. A. Robertsa, C. J. Wanga, R. Esterleinb, M. Stanforda and D. Mynorsa, "A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing," *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 49, no. 12, p. 916–923, 2009.

[16] D. Kechemair, "Contribution à l'étude de l'interaction laser matière : Instrumentation et optimisation de la trempe superficielle des aciers par laser CO2 continu," Thèse Université de Paris Sud, Centre d'Orsay, 1989.

[17] W. M. Steen, J. Mazumder and K. G. Watkins, Laser Material Processing, Springer; 4th ed, 2010.

[18] B. Srikanth, "THE EFFECT OF PROCESS VARIABLES ON MICROSTRUCTURE IN LASER-DEPOSITED MATERIALS," Ph.D Thesis, Wright State University, 2006.

[19] J. T. Hofman, "Development of an observation and control system for industrial laser cladding," Ph.D Thesis, Netherlands Institute for Metals Research, 1979.

[20] M. GEVER, "Identification, A personal view of the development of system," *IEEE Control systems magazine,* vol. 26, no. 6, pp. 93-105, 2006.

[21] S. Soloman, "Sensors and Control Systems in Manufacturing," The McGraw-Hill, Second Edition, 2010.

[22] J. Fraden, "Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications," Springer-Verlag , New York, 2004.

[23] Y. P. Hu, C. W. Chen and K. Mukherjeea, "Measurement of temperature distributions during laser cladding process," *JOURNAL OF LASER APPLICATIONS,* vol. 12, no. 3, p. 126—130, 2000.

[24] F. Meriaudeau, "Optimisation et contrôle d'un procédé de rechargement laser par vision artificielle," Thèse, Université de Bourgogne, 1997.

[25] M. Muller, "Etude du processus d'initiation par laser de la combustion d'un allige metallique sous atmosphere d'oxygene," Thèse, Ecole nationale superieur de mecanique et d'aeronautique, 2013.

[26] B. Guijun, S. Bert, G. Andres, W. Konrad and P. Reinhart, "Identification and qualification of temperature signal for monitoring and control in laser cladding," *Optics and lasers in engineering,* vol. 44, no. 12, pp. 1348-1359, 2006.

[27] P. Bonnet, "Cours de Traitement d'Images," Le laboratoire LAGIS, Université Lille1, 2013.

[28] A. C. Mazikowski, "Non-contact multiband method for emissivity measurement," *Infrared Physics & Technology,* vol. 44, pp. 91-99, 2003.

[29] I. T. Mehrdad, "Image-Based Feature Tracking Algorithms for Real-Time Clad Height Detection in Laser Cladding," Ph.D thesis, University of Waterloo, 2007.

[30] M. Doubenskaia, P. Bertrand and I. Smurov, "Optical monitoring of Nd:YAG laser cladding," *Thin Solid Films,* Vols. 453-454, pp. 477-485, 2004.

[31] D. S. Salehi, "Sensing and Control of Nd:YAG Laser Cladding Process," Ph.D Thesis, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2005.

[32] S. Shoujin, D. Yvonne and B. Milan, "CORRELATION BETWEEN MELT POOL TEMPERATURE AND CLAD FORMATION IN PULSED AND CONTINUOUS WAVE ND:YAG LASER CLADDING OF STELLITE 6," Proceedings of the Pacific International Conference

on Application of Lasers and Optics (PICALO 2010), Wuhan, China, 23-24 March 2010.

[33] D. Hu and R. Kovacevic, "Modelling and measuring the thermal behaviour of the molten pool in closed-loop controlled laser-based additive manufacturing," *J. Engineering Manufacture,* vol. 217, no. 4, pp. 441-452, 2003.

[34] F. Meriaudeau, "Real time multispectral high temperature measurement: Application to control in the industry," *Image and Vision Computing,* vol. 25, p. 1124–1133, 2007.

[35] M. PAVLOV, "Application des dispositifs de diagnostics optique multi-spectraux dans les procédés de fabrication additive : fusion sélective et projection laser coaxiale," Thèse ENISE, Saint-Etienne, 2011.

[36] B. Guijun, S. Bert, G. Andres, W. Konrad and P. Reinhart, "Development and qualification of a novel laser cladding head with integrated sensors," *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* vol. 47, pp. 551-561, 2007.

[37] N. M. Elias, G. P. Euripides, Z. Michalis, P. Laurent and L. Jean-Didier, "A survey on industrial vision systems, applications and tools," *Image and Vision Computing ,* vol. 21, p. 171–188, 2003.

[38] M. Paindavoine, "Traitement des images en temps réel," Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle - R6720, 2013.

[39] N. Ragot, Conception d'un capteur de stéréovision omnidirectionnelle : architecture, étalonnage et applications à la reconstruction de scènes 3D, Thèse Université de Rouen, 2004.

[40] G. Saeed, "Vision-based sensing of the welding process : a survey," *Int. J. Modelling, Identification and Control,* vol. 1, no. 2, 2006.

[41] G. R. B. E. Römer, R. G. K. M. Aarts and J. Meijer, "Dynamic models of laser surface alloying," *Lasers in engineering,* vol. 8, no. 4, p. 251–266, 1999.

[42] G. R. B. E. Römer, H. Zwart, K. d. Graaff and J. Meijer, "Multivariable control of laser alloying of Ti6Al4V," *Proceedings of the ICALEO'99, San Diego, U.S.A.,* 1999.

[43] M. Asselin, "Optical Sensor for Measurement of Clad Height during Laser Cladding Process," Ph.D thesis , University of Waterloo, 2006.

[44] J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi and A. Ghosh, "Closed loop direct metal deposition: art to part," *Optics and Lasers in Engineering,* vol. 34, pp. 397-414, 2000.

[45] S. Lijun, B. S. Vijayavel, D. Bhaskar and M. Jyoti, "Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process," *Int J Adv Manuf Technol,* vol. 58, p. 247–256, 2012.

[46] M. R. Boddu, R. G. Landers, S. Musti, S. Agarwal, J. Ruan and F. W. Liou, "System Integration and Real-Time Control Architecture of a Laser Aided Manufacturing Process," *Conference paper - 13th, Solid freeform fabrication symposium - University of Texas at Austin,* pp. 522-529, 2002.

[47] D. Hu and R. Kovacevic, "Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing," *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 43, no. 1, pp. 51-60, 2003.

[48] A. A. Faieza, "Manufacturing System," InTech, 2012.

[49] H. Derouet, "Instrumentation et contrôle en temps réel de traitement de surface par laser avec passage à létat liquide," Thèse, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 1996.

[50] E. Toyserkani and A. Khajepour, "A mechatronics approach to laser powder deposition process," *Mechatronics,* vol. 16, p. 631–641, 2006.

[51] J. L. Charron, "Mesures sans contact : Autres méthodes," Techniques de l'Ingénieur-Mesures Mécaniques et Dimensionnelles-R1334, 2013.

[52] R. Horaud and O. Monga, "Vision par ordinateur: outils fondamentaux," Hermes, 1995.

[53] A. Thomas, M. Rodd, J. Holt and C. Neill, "Real-time Industrial Visual Inspection: A Review," *Real-Time Imaging,* vol. 1, no. 2, p. 139–158, 1995.

[54] A.-C. Legrand, P. Suzeau, E. Renier, F. Truchetet, P. Gorria and F. Meriaudeau, "Machine vision systems in the metallurgy industry," *J. Electron. Imaging,* vol. 10, no. 1, pp. 274-282, 2001.

[55] D. PAJANI, "Thermographie : Principes et mesure," Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle - R2740, 2013.

[56] P. Fabre, "Appareillages de thermographie industrielle," Techniques de l'Ingénieur, R2750, 2014.

[57] C. Shan-Ben and W. Jing, "Intelligentized Methodology for Arc Welding Dynamical Processes : Visual Information Acquiring, Knowledge," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[58] R. Mezari, P. Aubry, T. Malot and K. Verdier, "3D analysis of the powder flow of laser cladding nozzles," *ICALEO, Paper 305,* 2012.

[59] TRUMPH, "Manuel technique : Description d'interfaces appareils laser continus HL3003D," 2000.

[60] B. M. Bernhard and P. M. Schwider, "On-line Control and quality improvement of laserbeam welding by High-dynamic CMOS cameras - a major step in manufacturing quality," In 4th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE), Erlangen, Germany., 2004.

[61] M. S. Antonio, F. Carlos, J. N. Pedro, Andrés and Iborra, "A Novel Method to Increase LinLog CMOS Sensors' Performance in High Dynamic Range Scenarios," *Sensors,* vol. 111, no. 9, pp. 8412-8429, 2011.

[62] S. M. Farssi, "SEGMENTATION D'IMAGES PAR DETECTION DE REGION, DE CONTOUR OU PAR MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE ETUDE COMPARATIVE ET EVALUATION DES PERFORMANCES," Thèse : FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES, UNIVERSITE CHEIKH ANA DIOP DE DAKAR, 1998.

[63] T. Ferre, "Traitements d'images optroniques," Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique - E4085, 2012.

[64] S. Mehmet and S. Bülent, "Survey over image thresholding techniques and quantitative

performance evaluation," *J. Electron. Imaging,* vol. 13, no. 1, pp. 146-168, 2004.

[65] L.-K. Huang and M.-J. J. Wang, "Image thresholding by minimizing the measures of fuzziness," *Pattern Recognition,* vol. 28, no. 1, p. 41–51, 1995.

[66] R. Hamid, "Image thresholding using type II fuzzy sets," *Pattern Recognition,* vol. 38, p. 2363 – 2372, 2005.

[67] G. Braviano, "LOGIQUE FLOUE EN SEGMENTATION D'IMAGES: SEUILLAGE PAR ENTROPIE ET STRUCTURES PYRAMIDALES IRREGULIERES," Thèse, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 1995.

[68] C. Zheru, Y. Hong and P. Tuan, "Fuzzy Algorithms : With Applications to Image Processing and Pattern Recognition," World Scientific Publishing, 1996.

[69] J. L. Charron, "Mesures sans contact : Méthodes optiques (partie 1 et 2).," Techniques de l'Ingénieur-Mesures Mécaniques et Dimensionnelles - R1332 et R1333, 2013.

[70] F. Hirigoyen, "Conception et adaptation d'un télémètre à champ coupé sur un dispositif de rechargement laser Nd:YAG," Rapport CLFA GERAILP, Arcueil, 2002.

[71] C. Doumanidis and Y.-M. Kwak, "Geometry Modeling and Control by Infrared and Laser Sensing in Thermal Manufacturing with Material Deposition," *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 123, no. 45, 2001.

[72] G. Dreyfus, Neural Networks: Methodology and Applications, Springer ed., 2005.

[73] T. Soderstrom and P. Stoica, "System Identification," Prentice Hall, 1989.

[74] G. Marrion, "Modélisation de procédés de fabrication additive de pièces en Ti-6al-4V (DMD et SLM) : Approche thermique, métallurgique et mécanique"," Séminaire sur la fabrication additive organisé par le CNES, Toulouse, November 2013.

[75] A. Vasinonta, M. Griffith and J. L. Beuth, "Process Maps for Predicting Residual Stress and Melt Pool Size in the Laser-Based Fabrication of Thin-Walled Structures," *J. Manuf. Sci. Eng,* vol. 129, no. 1, pp. 101-109, 2006.

[76] G. R. B. E. Römer, H. Zwart, K. A. J. d. Graaff and J. Meijer, "Modelling of the temperature field induced by laser surface irradiation by laser surface irradiation in view of the feedback control theory," *Lasers in engineering,* vol. 7, pp. 179-197, 1998.

[77] F. C. J. Bataille and D. Kechemair, "A systematic method for the design of multivariable controller actuating power and speed during a CO2 laser surface treatment," *Journal of Laser Applications,* vol. 4, no. 1, p. 43—47, 1992.

[78] A. Peligrad, E. Zhou, A. Morton and L. Li, "Dynamic models relating processing parameters and melt track width during laser marking of clay tiles," *Optics & Laser Technology ,* vol. 34, pp. 115-125, 2002.

[79] E. Toyserkani, A. Khajepour and S. Corbin, "Application of experimental-based modeling to laser cladding," *JOURNAL OF LASER APPLICATIONS,* vol. 14, no. 13, 2002.

[80] B. Roland, Advanced Control Engineering, Butterworth-Heinemann, 2011.

[81] J. A. Pérez, J. L. and C. Molpeceres, "Design of an advanced incremental fuzzy logic controller for laser surface heat treatments," *Int J Adv Manuf Technol (2008),* vol. 36,

p. 732–737, 2008.

[82] S. Shieh, J. S. Huang and L. and Li, "Fuzzy Logic Control for the Ti6A14V Laser Alloying Process," *Int J Adv Manuf Technol,* vol. 8, p. 247–253, 2001.

[83] Z. Meysar and K. Amir, "Development of an adaptive fuzzy logic-based inverse dynamic model for laser cladding process," *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* vol. 23, p. 1408–1419, 2010.

[84] M. K. Sameni, E. Toyserkani and A. Khajepour, "FUZZY MODEL AND COMPACT FUZZY MODEL IDENTIFICATION OF LASER CLADDING," *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2004),* 2004.

[85] M. Alimardani and E. Toyserkani, "Prediction of laser solid freeform fabrication using neuro-fuzzy method," *Applied Soft Computing,* vol. 8, p. 316–323, 2008.

[86] J. A. Perez, M. Gonzalez and D. Dopico, "Adaptive neurofuzzy ANFIS modeling of laser surface treatments," *Neural Comput & Applic,* vol. 19, p. 85–90, 2010.

[87] J. A. Pérez and J. A. Orosa, "Neural modeling of laser surface treatments," *Int J Adv Manuf Technol,* vol. 46, p. 605–610, 2010.

[88] P. Sreeraj and T. Kannan, "Modelling and Prediction of Stainless Steel Clad Bead Geometry Deposited by GMAW Using Regression and Artificial Neural Network Models," *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 2012, 2012.

[89] L. Thiaw, "Identification de systèmes dynamiques non-linéaires par réseaux de neurones et multimodèles," Thèse : Genie Informatique, Automatique et Traitement du Signal, Université Paris XII, 2006.

[90] R. Orjuela, D. Maquin and J. Ragot, "Identification des systèmes non linéaires par une approche multi-modèle à états découplés," Journées Identification et Modélisation Expérimentale JIME'2006, Poitiers, France, 2006.

[91] N. Oliver, , Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models, Springer, 2000.

[92] Y. Zhu, "Multivariable System Identification For Process Control," Elsevier Science, 2001.

[93] V. Ocelik and J. T. M. De Hosson, "Thick metallic coatings produced by coaxial and side laser cladding: processing and properties," *Woodhead Publishing,* pp. 439-480, 2010.

[94] H. Garnier, M. Gilson, T. Bastogne and A. Richard, "Identification de modèles paramétriques à temps continu," Techniques de l'Ingénieur - s7140, 2007.

[95] A. Koehl, "Modélisation, Observation et Commande d'un Drone Miniature à Birotor Coaxial," Thèse, Université de Lorraine, 2012.

[96] L. Ljung, "System Identification Toolbox-User's Guide," The MathWorks, 2013.

[97] L. Ljung, "System Identification: Theory for the User (2nd Edition)," Prentice Hall, 1999.

[98] F. Alireza, K. Amir, T. Ehsan and D. Mohammad, "Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward PID controller," *Int J Adv Manuf Technol,* vol. 35, p. 280–292, 2007.

[99] M. R. Boddu, R. G. Landers and F. W. Liou, "CONTROL OF LASER CLADDING FOR RAPID PROTOTYPING – A REVIEW," 2002.

[100] T. Lie, R. Jianzhong, G. L. F. Robert and Liou, "Variable Powder Flow Rate Control in Laser Metal Deposition," *American Society of Mechanical Engineers ASME,* vol. 7, 2008.

[101] Z. Meysar and K. Amir, "Height Control in Laser Cladding Using Adaptive Sliding Mode Technique: Theory and Experiment," *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 132, 2010.

[102] T. Lie and R. G. Landers, "Melt Pool Temperature Modeling and Control for Laser Metal Deposition Processes," American Control Conference, June 10-12, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 2009.

[103] M. H. Farshidianfar, A. Khajepour, S. Khosravani and G. Adrian, "CLAD HEIGHT CONTROL IN LASER CLADDING USING A NONLINEAR OPTIMAL OUTPUT TRACKING CONTROLLER," *ICALEO 2013, Paper Number 1704,* 2013.

[104] J. A. Pérez, J. L. C. M. Molpeceres, M. Miguel, Manuel and Blasco, "Adaptive neural network control system for laser surface heat treatments," *Int J Adv Manuf Technol ,* vol. 41, p. 513–518, 2009.

[105] J. A. Pérez, J. L. and C. M. Molpeceres, "Hybrid fuzzy logic control of laser surface heat treatments," *Applied Surface Science,* vol. 254, p. 879–883, 2007.

[106] G. Balas, R. Chiang, A. Packard and M. Safonov, "Robust Control Toolbox," The MathWorks, 2013.

[107] S. Sastry and M. Bodson, "Adaptive Control : Stability, Convergence, and Robustness," Prentice-Hall, 1989.

[108] P. Apkarian, "Elements de la Theorie de la commande robuste," Notes de cours, 1993.

[109] M. Morari and E. Zafiriou, "Robust Process Control," Prentice-Hall, 1989.

[110] S. S. P. Ricardo and S. Mario, "Robust Systems. Theory and Applications," Wiley-Interscience, 1998.

[111] J. Doyle, B. Francis and A. Tannenbaum, "Feedback Control Theory," Macmillan, 1990.

[112] P. Apkarian and D. Noll, "Nonsmooth H-infinity Synthesis," *IEEE Transactions on Automatic Control,* vol. 51, no. 1, pp. 71-86, 2006.

[113] J. K. Åström, "Control System Design," Lecture Notes for ME 155A - Department of Mechanical and Environmental Engineering - University of Santa Barbara, 2008.

[114] P. Gahinet and P. Apkarian, "Structured H∞ Synthesis in MATLAB," In Proceedings IFAC, Milan, 2011.

[115] H.-P. Huang, M. Ohshima and I. Hashimoto, "Dynamic Interaction and Multiloop Control System Design," *Journal of Process Control,* vol. 4, no. 1, pp. 15-27, 1994.

[116] A. Maidi, "ANALYSE DES INTERACTIONS DANS LES SYSTÈMES À GRANDE ÉCHELLE : APPLICATION À LA COMMANDE MULTIBOUCLE DES SYSTÈMES FORTEMENT COUPLÉS," Mémoire de Magister - Spécialité : Génie électrique. Option : Automatique appliquée et traitement du signal., UNIVERSITÉ DE BOUMERDÈS - ALGERIE, 2001.

[117] B. Halvarsson, "Interaction Analysis in Multivariable Control Systems. Applications to Bioreactors for Nitrogen Removal," Uppsala Universitet, 2010.

[118] Q. G. Wang, Z. Ye, W. J. Cai and C.-C. Hang, "PID Control for Multivariable Processes," Spriger, 2008.

[119] T. Glad, Ljung and Lennart, "Control Theory : Multivariable and Nonlinear Methods," Taylor & Francis, 2000.

[120] M. PICASSO, "Simulation numérique des traitement de surface par Laser," École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 1992.

[121] J. Girardot, l. Illoul, P. Lorong, N. Ranc, M. Schneider, l. Berthe and V. Favier, "Simulation of the Laser drilling process with the constraint natural element method," *ICALEO 2012, Paper 204,* 2012.

Etude du contrôle de procédé de projection laser pour la fabrication additive : Instrumentation, Identification et Commande

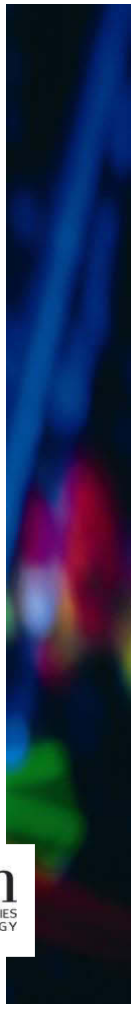
RESUME : Les applications utilisant les procédés de fabrication directe par laser et projection de poudre sont en pleine expansion, en particulier, dans l'aéronautique. Néanmoins, cette technologie prometteuse fait état de quelques points durs et est confrontée aux problèmes d'instabilités du procédé. Lorsque ces phénomènes ne sont pas maîtrisés, cela conduit à des défauts (résistances mécaniques insuffisantes, porosités trop importantes, mauvais états de surface,….etc), qui, selon leur répartition et leur taille, risquent d'engendrer des non conformités, de détériorer les caractéristiques mécaniques des pièces et qui peuvent représenter un coût de post-traitement non négligeable. Par conséquent, il est primordial de maîtriser le procédé d'élaboration, afin de rendre le procédé de fabrication robuste et préserver l'intégrité structurelle de la pièce. Cela requiert la mise en place de système d'instrumentation du procédé de projection laser, et par l'intermédiaire du contrôle procédé, d'avoir un système de commande temps réel permettant d'adapter les paramètres procédés en cours d'élaboration, afin de de maintenir une haute qualité de la pièce fabriquée. Dans cette perspective, nous avons développé une solution technologique (matérielle et algorithmique) à base de caméras (vision) permettant de suivre des paramètres clefs lors de la fabrication. L'application de ce système de vision a permis la mise en œuvre de méthodes innovantes, utilisant des outils de l'automatique moderne, pour surveiller l'état de pièces projetées, voire même corriger leurs défauts lors de la fabrication, en ayant un suivi et un contrôle du procédé en temps réel. De plus ce système de vision a permis à partir de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du procédé, d'identifié un modèle dynamique qui ont conduit à la réalisation du système de contrôle procédé.

Mots clés : procédé de fabrication rapide, bain liquide, vision par ordinateur, Systèmes dynamiques non-linéaires, identification des systèmes, contrôle/commande de procédés, commande robuste

Instrumentation, identification and control of laser direct metal deposition for additive manufacturing

ABSTRACT : Applications using the direct metal deposition laser process have been expanded rapidly, particularly in aeronautics. However, this promising technology reported some difficult points and faced several problems, mainly the process instability. When these phenomena are not controlled, several defects was obtained (lack of mechanical strength, excessive porosity, poor surface, ... etc.). According to their distribution and size, non-conformity, deteriorate the mechanical characteristics of the parts was recorded and result in a significant cost of post-processing. Therefore, it is important to control the process, to make the process both robust and preserve the structural integrity of the piece. This requires the development of instrumentation through the control process, in order to have a real-time system able to adjust the process parameters to keep a high quality of the manufactured part. In this perspective, the studied thesis developed a technological solution (hardware and algorithms) based on cameras (vision) to monitor key parameters during manufacture. The application of this vision system has been allowed for the implementation of innovative methods by using modern automatic tools to monitor the status of the built part or even correct their defects during the manufacture parts, having a monitoring and process control in real time. Furthermore this vision system performed measurements for the inputs and outputs of the process, matched to a dynamic model that lead to the realization of the process control system.

Keywords : rapid Manufacturing, melt pool, computer vision, non linear dynamical systems, system identification, process monitoring and control, robust control



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

paramètres critiques dans le cadre de l'optimisation d'un procédé. D'un autre côté, les paramètres de sorties sont ceux qui caractérisent la qualité finale de la pièce fabriquée. Dans ce qui suit certains des principaux paramètres sont expliqués. Le choix des entrées-sorties pour le contrôle procédé seront expliqués dans le §I.4.3.

Caractéristiques géométriques d'un cordon

La forme géométrique du dépôt réalisé par le procédé de projection laser, est une caractéristique importante à *contrôler* tout comme la microstructure [4]. C'est un indicateur de qualité de dépôt. La Figure I.3 représente un schéma en coupe d'un dépôt sur substrat massif. Les grandeurs géométriques relatives à un cordon sont d'une part les dimensions du cordon H_{app}, e_{app} et S_{app} (surface apparente du cordon) et d'autre part les dimensions de la zone refondue H_{zr} (hauteur de zone refondue) et e_{zr} (épaisseur de zone refondue) ainsi que les dimensions de la hauteur de Zone Affectée Thermiquement H_{zat} et e_{zat} (épaisseur de ZAT). L'angle de contact θ (appelé également : angle de mouillage) entre le cordon et le substrat est également caractérisé[3].

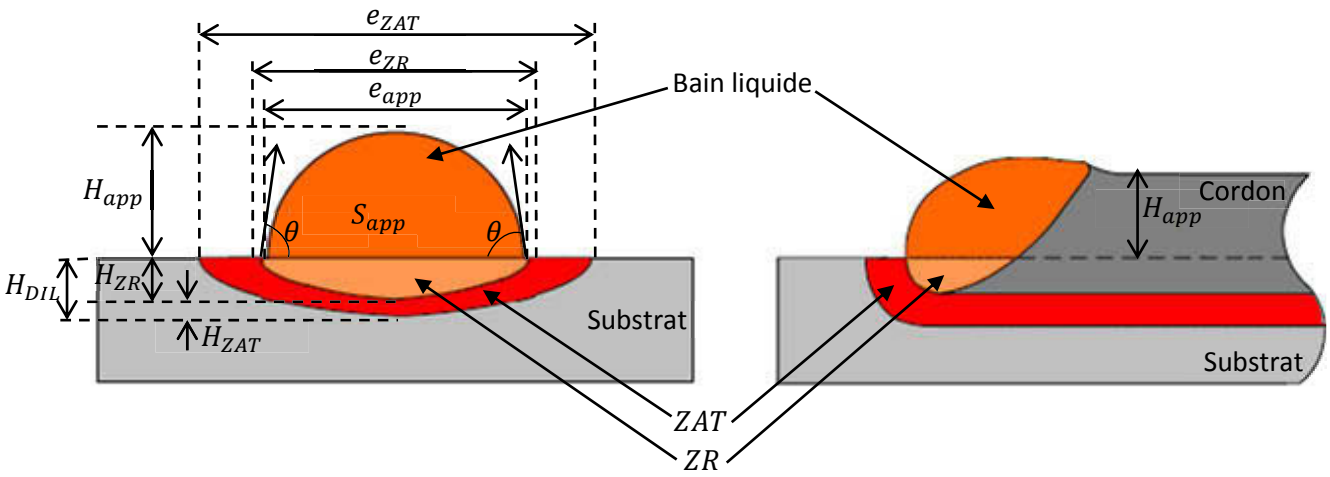


Figure I.3 – Caractéristiques géométriques d'un cordon déposé sur un substrat (vue en coupe) [5]

Dilution

La hauteur totale de la zone du substrat affectée par la déposition du cordon (H_{zr}+H_{zat}) est nommée hauteur de dilution H_{Dil} (Figure I.3). Le taux de refusions D% traduisant l'amplitude de la zone refondue entre le cordon et le substrat peut s'exprimer ainsi [4] :

$$D\% = \frac{H_{ZR}}{H_{ZR} + H_{app}} \qquad \text{(I.1)}$$

Etat de surface

L'état de surface (ou rugosité) des objets élabores par le procédé de projection laser présente des irrégularités comme le montre la Figure I.4. La superposition des dépôts est à l'origine des ménisques périodiques sur la surface latérale de la pièce fabriquée. Typiquement, l'amplitude des ondulations peut varier de l'ordre de 50µm à 500µm selon les paramètres opératoires. En plus de ces ménisques latéraux, les surfaces présentent une *rugosité* que l'on doit aux particules de poudre qui n'ont pas

[3] La valeur de l'angle θ influe sur la *qualité du recouvrement* entre cordons, c'est-à-dire sur le manque de matière qui peut éventuellement subsister lors de la juxtaposition de deux cordons successifs dans la direction Y (X étant la direction de balayage). Il semble que cet angle doit être inférieur à 80° pour assurer un recouvrement correct [5].

(Ml=Dm/V) sur les caractéristiques géométriques du cordon (Happ, eapp, Sapp, Hdil)[5], le rendement massique géométrique Rmg[6] et la typologie du cordon[7] en TA6V [5].

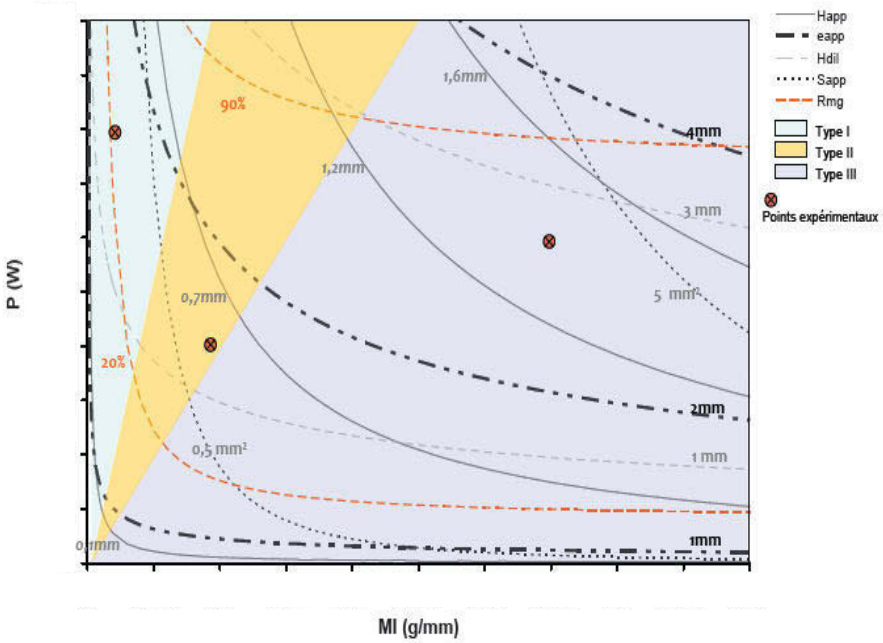


Figure I.6 – Cartographie du procédé de projection laser en TA6V dans le cas d'un cordon [5]

Il est à noter que ces cartographies permettent de sélectionner une fenêtre pour le choix des paramètres d'entrées (de commande) et des points de fonctionnement permettant d'obtenir des couches d'une certaine dimension (adaptées au tranchage CAO de la pièce) et une microstructure (phases) et macrostructure (grains) en adéquation avec les propriétés d'usage requises pour la pièce à construire(Cf. Chapitre III). Par contre, en pratique, l'exploitation de ces modèles est inadaptée à la synthèse d'une loi de commande, car ils sont en régime stationnaire et elles ne prennent pas en compte les dynamiques imposées par les variations sur les entrées. Pour la modélisation et le contrôle/commande, nous utilisons au chapitre III un modèle dépendant du temps (*modèle dynamique*). Néanmoins, ces cartographies sont adaptées à une géométrie bien particulière qui est le cordon ou le mur. Or, les stratégies employées pour la construction de pièces complexes peuvent induire des zones qui sont recuites de nombreuses fois du fait des passages successifs du laser, ce qui génère des différences de microstructures au sein de la pièce. En conséquence, ces cartographies ne seront pas toujours applicables à la construction de pièces réelles, en l'occurrence pour la prédiction des phases en présence [5].

I.4 Nécessité du contrôle de procédé en projection laser

Bien que la présente partie traite de l'automatique, il nous semble essentiel, avant d'aborder ce sujet de rappeler que l'automatique en tant que science fournit des méthodes et des outils

[5] La connaissance de Happ que génèrent les paramètres PVDm choisis permet de programmer convenablement l'incrément de montée de la buse ($\Delta Z = Happ$). Afin d'assurer un recouvrement optimal entre deux cordons constitutif du remplissage d'une zone de la pièce, la prévision de eapp et de la typologie du cordon permet la programmation adéquate de l'écart ΔY ou ΔX entre cordons successifs.

[6] Cette mesure a été déterminée à partir de la masse volumique du matériau et de la masse linéique :

$$Rmg = \frac{\rho.V.Happ.eapp}{Dm} = \rho.Sapp.(\frac{1}{Ml})$$

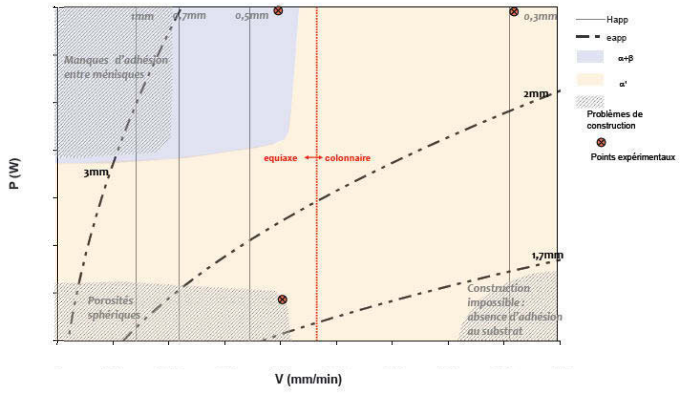
[7] L'angle de contact θ entre le cordon et le substrat (Cf. Figure I.3) permet de classifier les cordons selon trois morphologies: le type I pour un angle < 90 , type II pour un angle $\theta = 90$ et type III pour un angle $\theta > 90$

pièces fabriquées[9] sont en effet très nombreuses (Cf. I.2.2). Ces propriétés peuvent être classées en trois domaines :

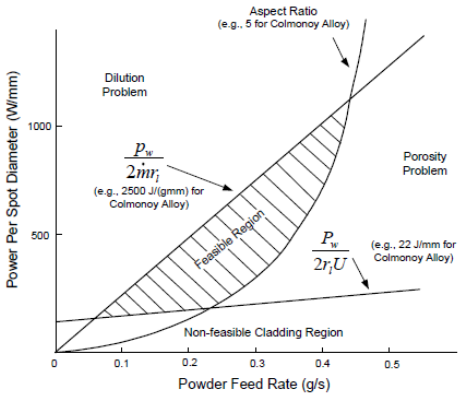
- Les propriétés *dimensionnelles* : dimension du cordon, dilution, rugosités,…
- Les propriétés *métallurgiques* : gradients thermiques, vitesse de chauffage et vitesse de refroidissement, …
- Les propriétés *mécaniques* : dureté, contraintes résiduelles, ….

Si la solution qui consiste à mesurer les propriétés métallurgiques et mécaniques est séduisante, elle nécessite l'utilisation des modèles analytiques, couplés aux mesures de nombreux paramètres directement ou indirectement reliés à ces propriétés. Comme nous l'avons souligné dans la partie précédente, cette démarche est *longue*, souvent *difficile*, et elle nécessite des technologies très variées et des compétences très *pluridisciplinaires*. Il existe également quelques risques quant à l'évaluation de la qualité de ces propriétés, qui dépend du degré de confiance dans le modèle, dans les mesures, dans les paramètres du modèle et dans l'absence de perturbations (Cf. §III.2.1).

L'instrumentation d'un procédé est un problème qui doit être bien posé avant de tenter de le résoudre. Il faut étudier avant tout quelle est la mesure pertinente à réaliser. L'analyse du procédé, sur la base des cartographies de procédé, propose des démarches appropriées à ce type de problème. Sur ces cartographies sont généralement représentées les courbes d'iso-valeurs des dimensions du cordon (Hauteur et Largeur), les zones où la construction présente des défauts tels que des fissures, des manques d'adhésion entre couches ou des porosités, les plages paramétriques où la dilution est accrue, la microstructure est majoritairement $\alpha + \beta$ ou bien $\acute{\alpha}$ et enfin la frontière de part et d'autre de laquelle la construction présentent des grains colonnaires ou équiaxes [19] [5] [13] [17]. Citons comme exemple les résultats de [5] sur un mur 2D en Ti-6Al-4V[10] (Figure I.7.A) et ceux de Steen [17] sur l'alliage de Colmonoy (Figure I.7.B).



A : [5]



B : [17][11]

Figure I.7 – Cartographie du procédé de projection laser

Cette étude nous permet de comprendre que le contrôle du procédé réside dans la parfaite *maîtrise du bain liquide* qui est notre *outil de construction de la géométrie de la pièce* et qui est le *reflet de certaines propriétés du bain liquide* et après solidification du cordon de matière (Figure I.8). La première grandeur qu'il convient de contrôler est la *hauteur du bain*. De même une valeur minimum

[9] Nous pouvons retenir la définition de la qualité d'un produit telle qu'elle est présentée dans la norme ISO 8402 : "L'ensemble des caractéristiques du produit qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites".

[10] L'intérêt de cette carte est de connaître par avance les caractéristiques géométriques et métallurgiques de la pièce (en l'occurrence ici le mur) en fonction des paramètres d'entrée choisis.

[11] Aspect Ratio (représente le rapport de la largeur du cordon à sa hauteur), P_w (la puissance), r_l (rayon du faisceau), U (Vitesse) et $\dot{m}$ le débit massique.

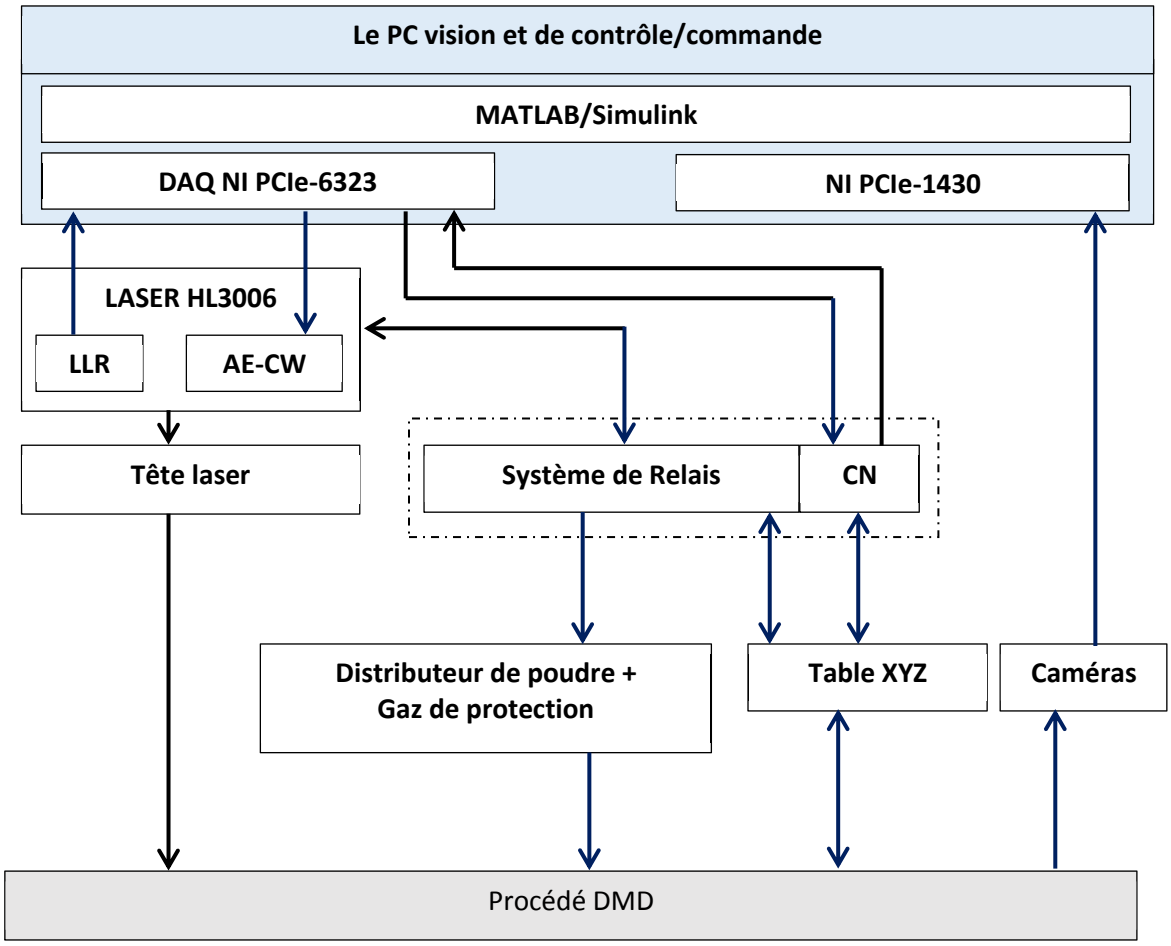


Figure II.22 – Flux d'information entre les différents modules de la chaine d'acquisition et de commande

Une armoire électrique contenant les variateurs numériques pour l'actionnement des servomoteurs (la CN : commande numérique) et plusieurs relais électromagnétique (12V) qui servent à *commander l'obturateur du faisceau, le distributeur de poudre et l'électrovanne de la protection gazeuse*. La synchronisation des commandes et des mesures est ainsi réalisée directement via un programme écrit en code G. Les caméras, associées à la carte d'acquisition NI PCIe-1430 – Dual-Channel Camera Link – de National Instruments, sont synchronisées par une horloge externe délivrée par la carte d'acquisition NI PCIe-6323[31] qui permet aussi l'acquisition et le contrôle simultané et en temps réel des E/S du système.

La tâche d'acquisition et du traitement d'images sont au cœur de notre application et prennent un certain temps. Ce temps dépend du matériel (la caméra et la carte d'acquisition) et l'unité du traitement utilisée. Pour avoir un *système d'acquisition en temps réel*, un ordinateur de type PC a été acheté pièce par pièce et assemblé pour ce type d'application. Il s'agit d'un *PC industriel destiné au prototypage rapide des applications temps réel.*

[31] Cette carte d'acquisition de données (DAQ : Data AQuisition) offre un niveau de performances avec le débit élevé du bus PCI Express (250 Mo/s), ainsi qu'un driver (NI-DAQmx) et des logiciels d'acquisition de données optimisés pour le multicœur et le temps réel. Elle possède 32 entrées analogiques (250 kéch./s, résolution de 16 bits, ±10 V), 4 sorties analogiques (900 kéch./s, résolution de 16 bits, ± 10 V), 48 E/S numériques, 4 compteurs/timers 32 bits (pour les fréquences d'échantillonnage pour les boucles de régulation, le comptage d'événements, etc) (Source : www.ni.com).

Dans le mode relatif, la nouvelle vitesse d'avance est indiquée comme un pourcentage de la vitesse indiquée dans le programme pièce. *La valeur de consigne (entrée analogique) en mode relatif ajuste la vitesse d'avance de 0 à 120% de la valeur indiquée dans le programme pièce* (Figure II.26). Par exemple, si la vitesse programmé est 400mm/min, la vitesse d'avance peut être ajustée de 0 à 480mm/min selon la valeur de la consigne.

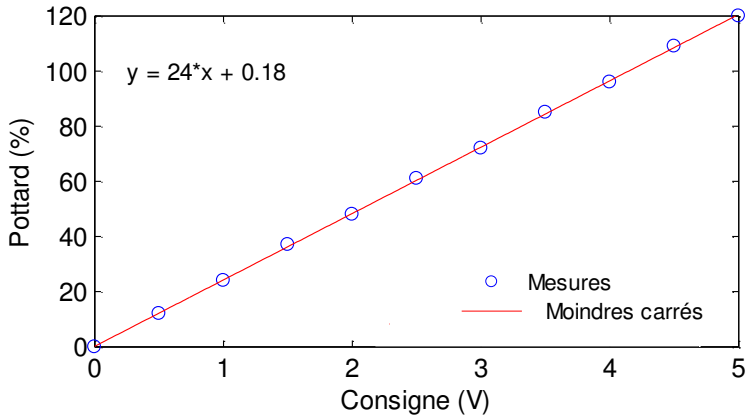


Figure II.26 – La consigne en fonction de la commande en tension

II.5.4 Etalonnage du débit de poudre

Le distributeur de poudre TWIN10C permet la projection de poudres de granulométrie comprise entre 2 et 200µm (poudres fluides et non fluides) au niveau de la surface d'interaction à l'aide d'un gaz porteur (en général de l'argon). Bien que le débit massique dépende essentiellement du plateau de dosage (taille de la rainure) et de sa vitesse de rotation, *un étalonnage est primordial* avant toute série de manipulations car différents facteurs annexes peuvent modifier (limiter) la valeur de débit massique. C'est le cas de [6] :

- La température et l'hygrométrie ambiante
- La qualité de la poudre : les poudres étuvées et sphériques ont une meilleure coulabilité que les poudres non sphériques, et l'histogramme de taille de la poudre (% total = f(diamètre)) modifie le taux de remplissage des rainures
- Le débit du gaz porteur, à un degré moindre

Lors des expériences réalisées, les différents paramètres suivants : débit de gaz porteur et taille de la rainure du plateau ont été fixés, et seule la vitesse de rotation du plateau a été utilisée pour changer le débit massique.

L'étalonnage de la poudre a consisté à tracer la courbe $D_m=f(N_{rpm})$, avec N_{rpm} le nombre de tour par minute du disque du distributeur de poudre.

II.6 Mise en œuvre du capteur de mesure du bain liquide

II.6.1 Introduction

Les capteurs à base de caméra ont été largement développés ces vingt dernières années [53], et permettent aujourd'hui de mesurer de nombreuses grandeurs physiques dont la température et les dimensions du bain liquide. L'ensemble de ces paramètres permet ainsi d'accéder aux paramètres procédés en cours l'élaboration et en temps réel. *La vision par ordinateur apparaît comme la technologie la plus prometteuse pour le contrôle qualité de pièces projetées*. En effet, comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique de la première partie de ce chapitre, l'utilisation des capteurs à base de caméra (vision passive) du procédé de projection laser permet non seulement d'acquérir

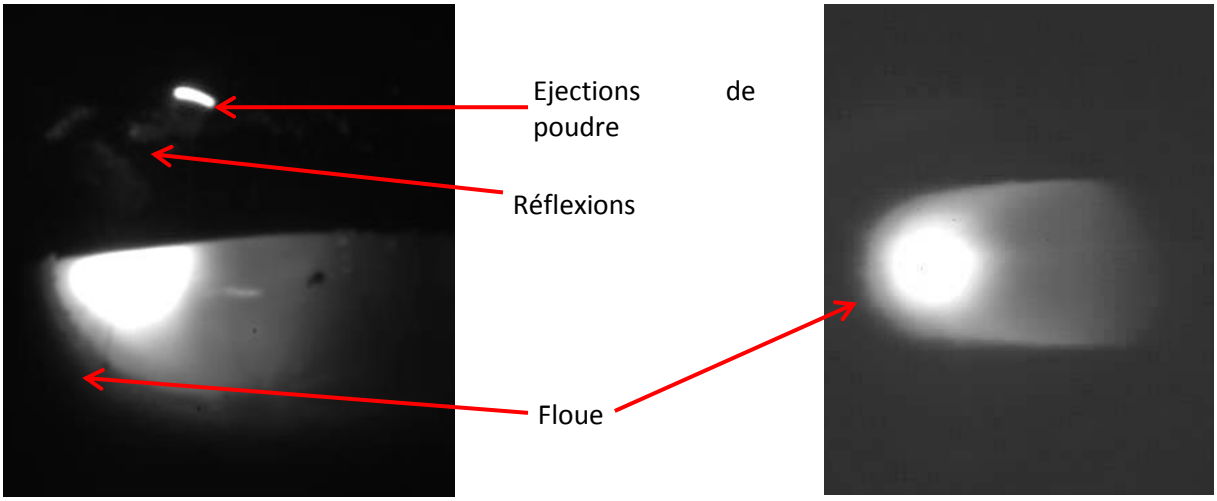


Figure II.34 – Images du bain liquide : (a) vue latérale, (b) vue coaxiale

L'étude de ces images a permis de mettre en évidence de nombreux problèmes et de dégager des orientations futures sur les algorithmes de traitements d'images à utiliser.

II.6.3 Mesure 2D du bain liquide

II.6.3.1 Le montage

La Figure II.35 donne un schéma du montage expérimental utilisé pour visualiser le bain liquide durant sa formation en coaxial (vue du bain par-dessus).

Dans ce montage, la lumière provenant de la zone de fusion passe vers le haut à travers la lentille de focalisation du laser. Ensuite, elle est déviée par un miroir dichroïque qui laisse passer la longueur d'onde du ND:YAG (1064nm) et qui réfléchit le visible vers le système optique de la caméra coaxiale, constitué par un miroir de renvoi, un diaphragme, une lentille de collimation de mise au point et d'un filtre passe-bas éliminant la longueur d'onde du rayonnement laser.

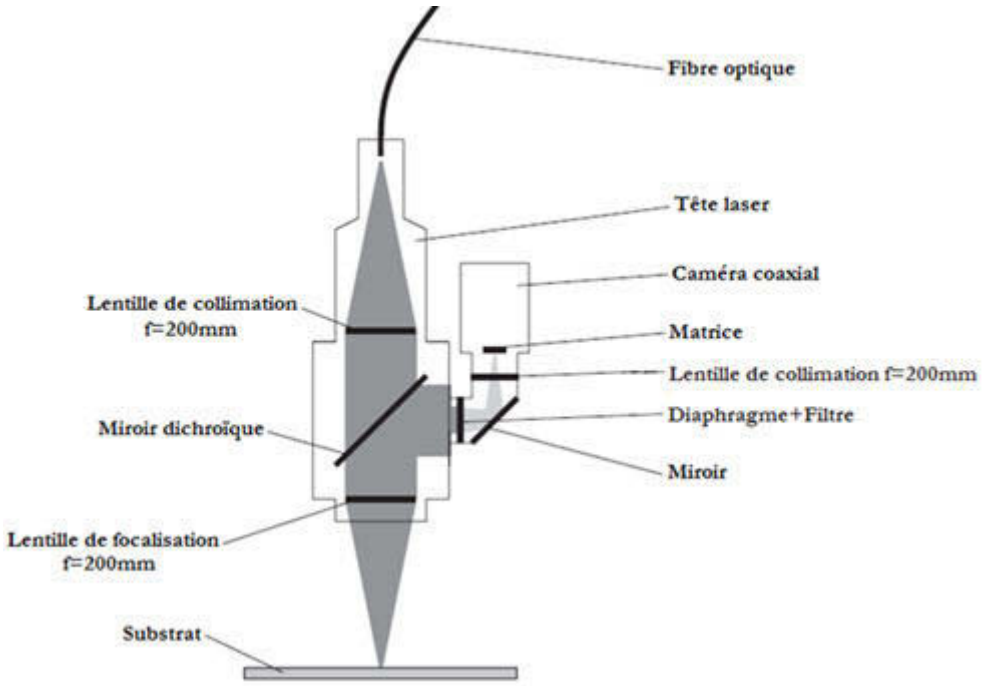


Figure II.35 – Schéma simplifié du montage expérimental

II.6.3.2 Les traitements d'images développées

Les traitements d'images développés au cours de cette étude sont de plusieurs ordres. Elles ont pour but d'extraire les caractéristiques géométriques du bain liquide qui seront ensuite utilisées dans l'étude du procédé en boucle ouverte (identification des modèles) et dans la boucle pour le contrôle/commande du procédé de projection laser (Figure II.37).

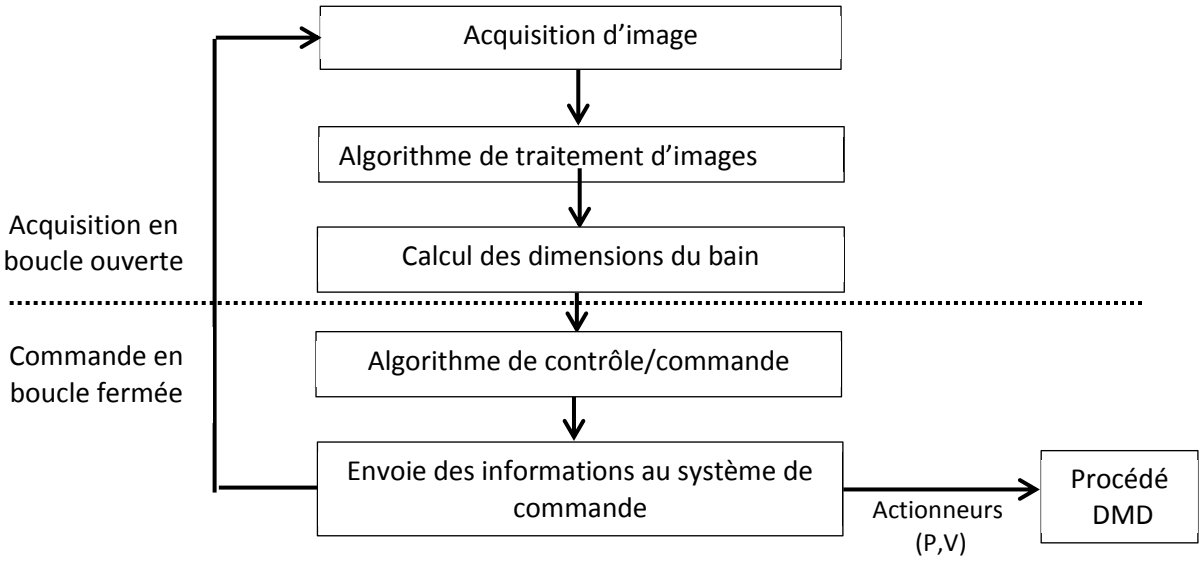


Figure II.37 – Organigramme représentant les étapes et des algorithmes de traitement d'images

Pour l'étude du procédé en boucle ouverte, les images sont traitées en *différé*. Les vidéos du bain issues des caméras sont enregistrées sur disque dur. Pour chaque vidéo, un fichier log est enregistré contenant l'information temporelle (timecode) pour chaque image (le numéro d'image attendu dans le disque dur, le numéro de l'image enregistré, la date et l'heure[43]).

En vue d'automatiser la procédure d'acquisition et du traitement d'images, nous avons développé au cours de cette thèse plusieurs programmes MATLAB. Dans cet objectif, la réalisation a été guidée par les fonctionnalités suivantes :

- Contrôler automatiquement le déroulement de l'acquisition des images et les signaux E/S. Pour cela, nous avons réalisé un circuit électronique qui a été ajouté à l'extérieur de la machine. Ce système détecte le déclenchement du tir laser et génère ainsi le démarrage de l'acquisition d'images et les signaux d'E/S[44]. La durée de l'enregistrement est la durée totale de fabrication.
- Présenter une interface graphique conviviale permettant d'analyser facilement les résultats. Ce programme recueille les images de la séquence vidéo, les données issues de la carte d'acquisition E/S et affiche les grandeurs de surfaces, comme la longueur, la largeur, la surface du bain, et la hauteur du bain. Ce programme peut être modifié à volonté pour s'adapter à un travail légèrement différent. La totalité des résultats est sauvegardé dans un fichier « .mat ».

Pour *le traitement d'images en temps réel pour le système de contrôle commande*. Les opérations sont les mêmes que celles définies pour le différé : Acquisition de l'image, prétraitement, segmentation et calcul des dimensions du bain. Ces opérations seront détaillées dans les

[43] Ce ficher est utilisé à vérifier qu'il n'y a pas eu de saut d'images, lors de l'acquisition, chose qui peut arriver lors d'étranglement des bus de communication ou saturation des disques durs

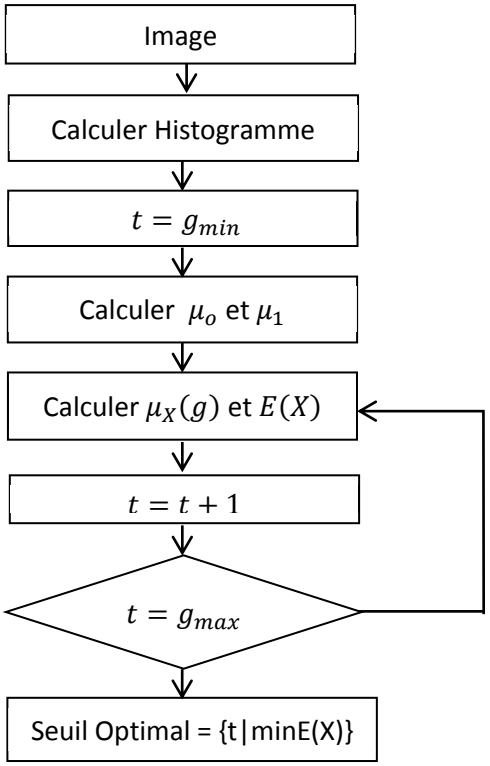
[44] Nous verrons par la suite que cette opération est très importante pour l'étape de modelisation et identification (Cf. Chapitre III)

La constante *C* est choisie pour que $0.5 \leq \mu_x(g) \leq 1$. Cette fonction possède la particularité de ne pas avoir une grande variation de ses valeurs.

$$\mu_X(g) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-(g-\mu_o)^2}{2\sigma^2}\right) & Si\ g \leq t \\ \exp\left(\frac{-(g-\mu_1)^2}{2\sigma^2}\right) & Si\ g \geq t \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

La valeur σ permet de régler l'échelle de la gaussienne et elle est fixée à α x L *avec* $0 < \alpha \leq 1$.

Algorithme



Résultats

La méthode proposée a été testée et validée sur un ensemble d'images du bain liquide dans différentes conditions. La figure suivante représente les résultats obtenus sur lesquels ont été appliqués un seuillage manuel, la méthode proposée dans ce travail, et les méthodes classiques de seuillage trouvées dans la littérature [64].

Pour préparer au mieux le contour pour l'étape finale de calcul des dimensions du bain, on a utilisé un *lissage par le barycentre*. Cet opérateur nettoie l'image des résidus provenant d'une mauvaise délimitation de la classe correspondant au niveau logique 0 (le fond), de plus, son action permet de limiter les fluctuations des bords du bain liquide. Ainsi les points de coordonnées (x,y) sont remplacés par le barycentre calculé sur cinq points.

II.6.3.3 Extraction des caractéristiques géométriques du bain

En partant du résultat de détection de contour de l'image coaxiale du bain, nous allons pouvoir extraire les caractéristiques géométriques du bain liquide. Dans cette partie, nous allons présenter la méthodologie que nous avons utilisée.

II.6.3.3.1 Centre de Gravité

Pour le calculer, on va utiliser les coordonnées en x et y du contour du bain. On calcule la somme des coordonnées en x pour chaque point et on divise par le nombre total de points. Même opération pour les y. La coordonnée trouvée est le centre de gravité du bain liquide (Figure II. 43).

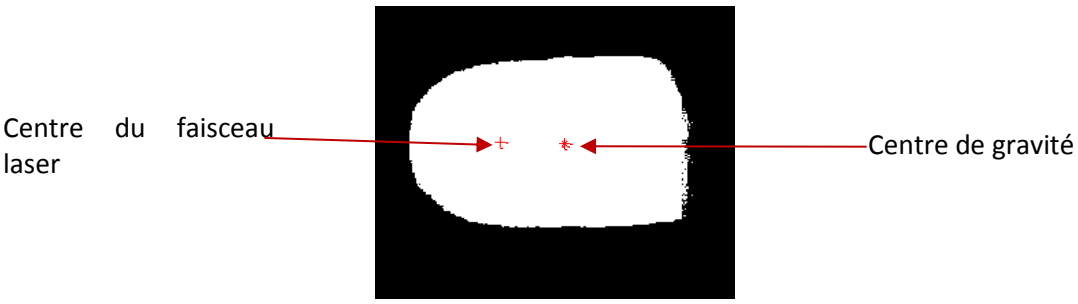


Figure II. 43 – Centre de gravité du bain liquide

II.6.3.3.2 L'orientation du bain

L'orientation du bain nous renseigne sur le sens de la trajectoire de la pièce. *Cette information peut être obtenue soit directement par la CN* quand cela est possible (mais ça n'était pas le cas dans notre système), soit par le calcul de l'angle θ, représentant l'angle de rotation de l'axe passant par le centre de gravité du bain liquide par rapport à l'axe traversant le centre du faisceau laser (Figure II.44).

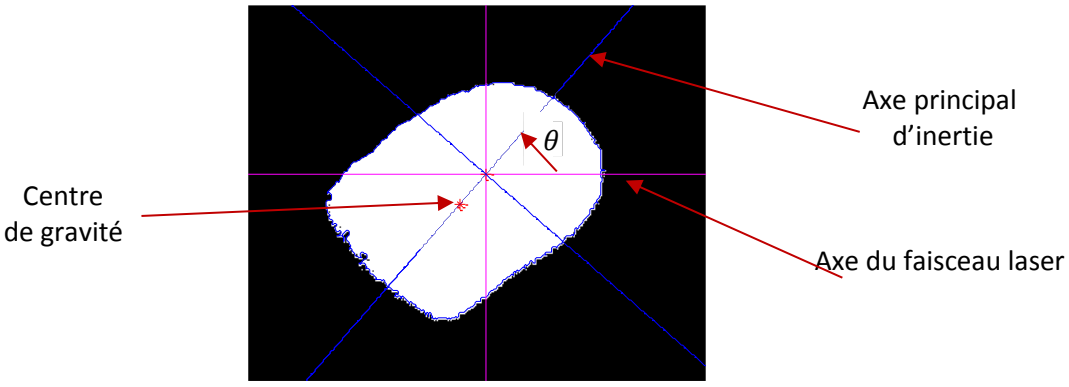


Figure II.44 – Orientation du bain liquide

La Figure II.45 représente un exemple de graphe généré par le calcul de l'angle. Les images ont été prises par la caméra coaxiale pour un déplacement en *aller/retour* de la buse en transversal avec un temps de pause aux extrémités.

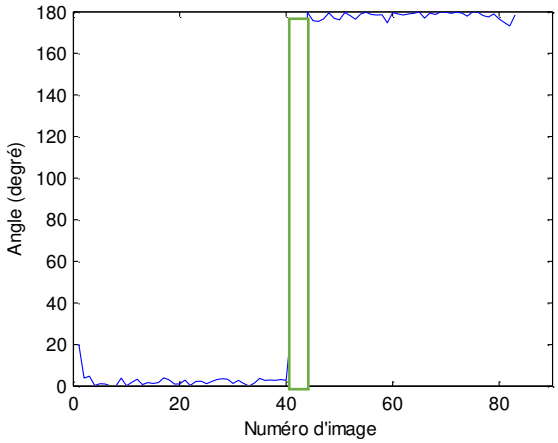


Figure II.45 – Calcul de l'angle sur un cordon (déplacement aller/retour linéaire)

II.6.3.3.3 Longueur et largeur du bain

A partir du contour du bain liquide, on calcule les dimensions du rectangle dans lequel est inscrite la surface du bain (*bounding box*)(Figure II.46). La longueur et la largeur du bain correspondent aux dimensions de la bounding box (longueur L1 et largeur L2).

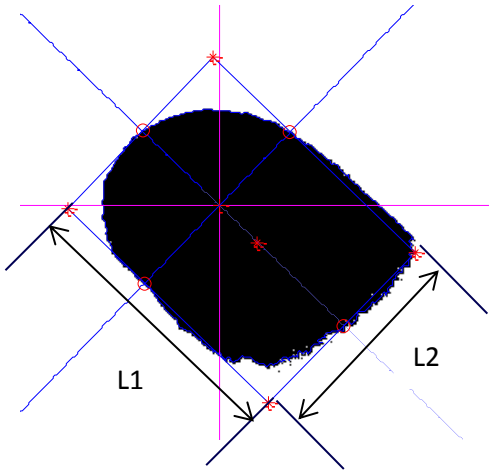


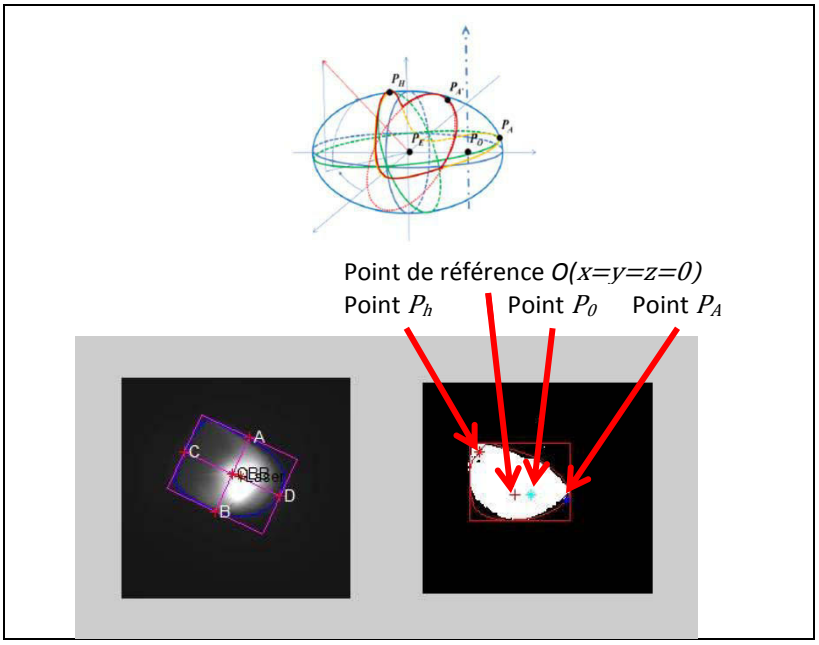
Figure II.46 – Calcul de la longueur et la largeur du bain

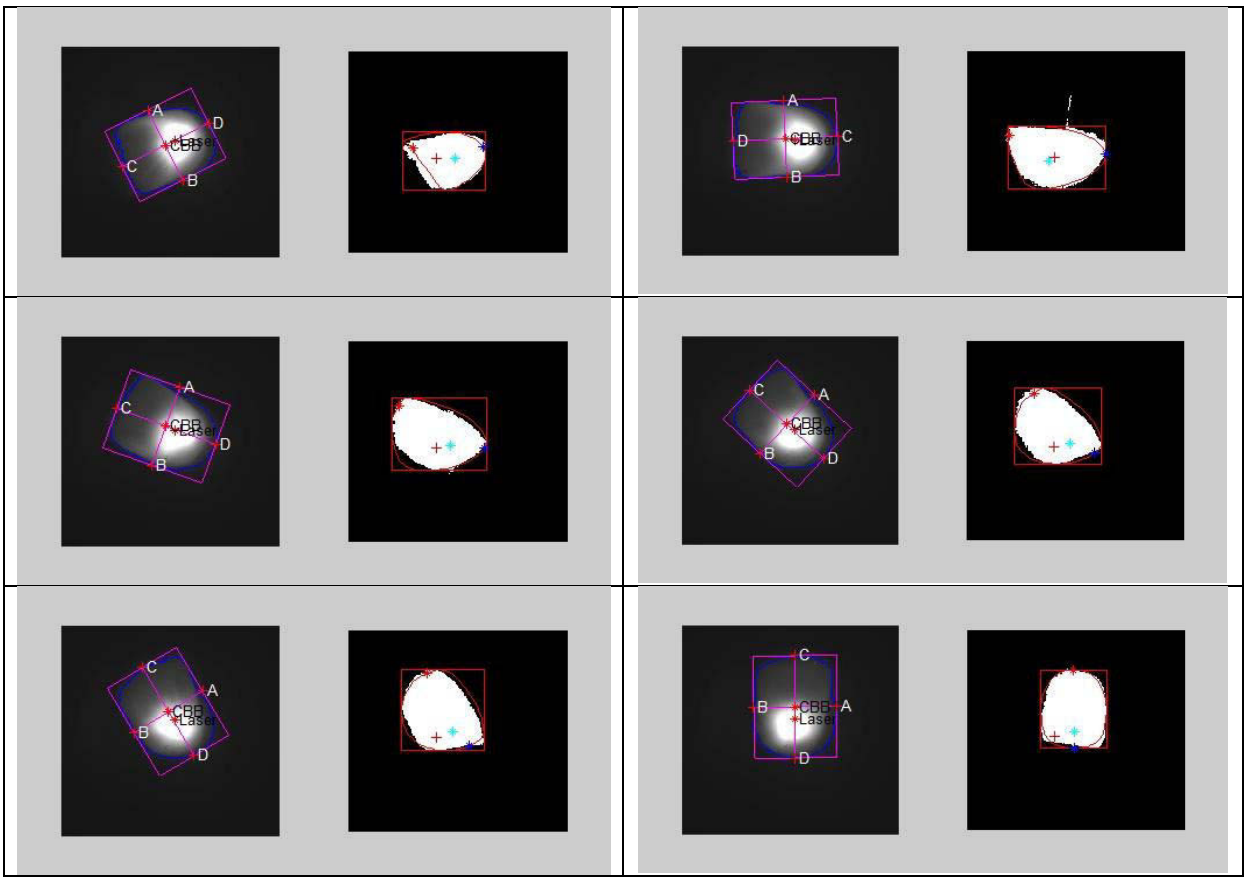
La figure suivante, montre le résultat de calcul de la largeur du bain pour une variation de puissance sous forme *sinusoïdale*.

II.6.5.2.4 Exemple de mesure en Z

Le système dans l'implémentation décrite ci-dessus a pu être évalué sur des séquences d'images coaxiales et latérales pour plusieurs conditions paramétriques, principalement pour le TA6V.

Les images ci-dessous présentent le calcul de la position en Z du bain sur une séquence de projection laser de TA6V sur une trajectoire circulaire. Ceci permet d'observer le comportement de l'algorithme pour toutes les orientations du bain vis-à-vis de la caméra latérale.





fonctions de la forme (équation (III.1)). Cette famille de fonctions est paramétrée par le vecteur de paramètres θ_i, définissant la structure du modèle local i, et le vecteur de paramètres β_i, caractérisant la zone de validité de ce même modèle local (Figure III.15).

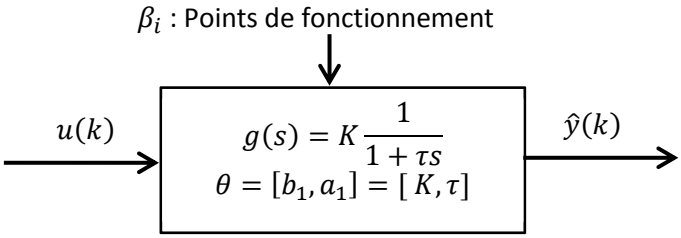


Figure III.15 – Estimation paramétriques des multi modèles

Le but d'une *procédure d'estimation parametrique* est de déterminer pour chaque modele local i les valeurs numériques de ces deux paramètres b_1 et a_1 (K et τ) de façon à ce qu'un critère de performance J (ou *fonction de coût*) du modèle soit *optimal* dans le but d'approcher la sortie du système par celle du modèle, on parle alors de *méthodes globales de minimisation* ou méthodes directes. Ce critère de performance est une fonction de l'écart appelée aussi erreur de prédiction entre la sortie réelle du système et celle du modèle.

L'erreur de prédiction (appelé aussi *résidu*) entre la sortie réelle du système et celle du modèle est obtenue par :

$$\varepsilon(t) = y_s(t) - \hat{y}(t) \tag{III.10}$$

Le critère quadratique (ou la fonction de coût des moindres carrés) est le plus utilisé. Il s'exprime par:

$$J = \frac{1}{2}\sum_{t=1}^{N}\left(\varepsilon(t)\right)^2 \tag{III.11}$$

où N désigne le nombre de mesures (taille de la séquence). Cette fonction scalaire positive est nulle uniquement si les sorties du modèle correspondent parfaitement aux mesures.

Les méthodes d'estimations utilisées pour la minimisation de la fonction de coût sont ceux disponibles sous MATLAB dans la Toolbox ident. Pour plus de détails, sur les algorithmes de minimisation de la fonction de coût, le lecteur pourra se reporter aux livres [73] [97]. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les méthodes de type moindres carrés[68]. Les résultats sont confirmés tant au niveau du nombre d'itérations nécessaires pour atteindre le critère d'arrêt qu'au niveau de la précision des modèles identifiés.

Notons que ces modèles entrée-sortie permettent de représenter simplement des procédés physiques complexes, mais il est bien clair que les paramètres intervenant dans ces modèles perdent toute signification physique. Ils permettent cependant de mieux évaluer les caractéristiques du procédé (dynamique, stabilité,….etc) pour la synthèse d'une loi de commande

III.5.4 Résultats d'identification

Les valeurs numériques des paramètres estimés des modèles de la largeur du bain pour l'ensemble des points de fonctionnement sont données dans le Tableau III.2. Pour chaque point de fonctionnement on a réalisé au moins 5 mesures. Des calculs d'erreur sur la constante de temps et le gain ont été effectués à partir des écarts-types calculés d'après les dispersions moyennes des

[68]La méthode des moindres carrés, indépendamment élaborée par Legendre en 1805 et Gauss en 1809, permet de comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure, à un modèle mathématique censé décrire ces données. Elle peut être divisée en deux catégories, linéaire (admettant une solution analytique) et non linéaire (solution par itération numérique) [91] [92].

Il apparaît clairement de la Figure III.23 que *la température augmente avec le nombre de couches déposées précédemment*. Cette tendance se retrouve également dans l'étude de [5] (Voir Figure II.4) et s'explique par le fait que le substrat étant froid au départ de la construction du mur, la température du bas du mur augmente au fur et à mesure que les couches sont empilées puis diminue lorsque les pertes énergétiques par conduction via le substrat deviennent prédominantes comparées à l'énergie apportée pour accroître la hauteur du mur.

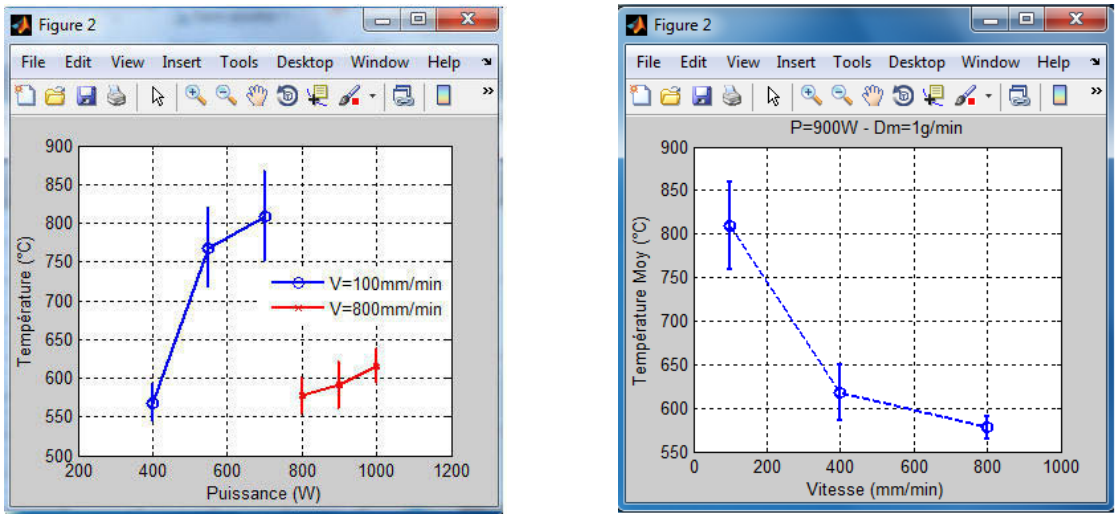
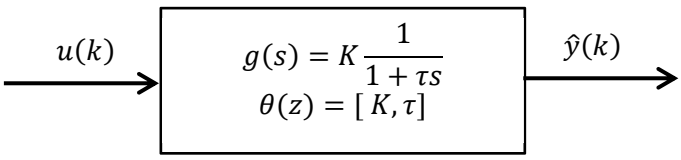


Figure III.24 – Evolution de la température de luminance en fonction de la puissance et de la vitesse

On voit également sur Figure III.24 l'influence de la puissance laser et de la vitesse de déplacement sur la température. *Ces tendances sont également constatées dans la littérature* [26] *(Voir Figure II.3)*. *La température augmente avec la puissance et diminue avec la vitesse*. L'impact de la puissance vis-à-vis de la température est plus prononcé que celui de la vitesse. L'explication tient au fait que la vitesse V modifie à la fois la quantité d'énergie P/V apportée au mur et la quantité de poudre injectée dans le bain liquide (donc la hauteur) alors que la puissance P ne fait qu'augmenter l'énergie linéique (la hauteur reste constante quand P augmente). Dans tous les cas, le gradient thermique est vraisemblablement très fort autour du bain liquide et augmente avec la puissance [6].

De la même manière que nous avons pu déterminer la fonction de transfert sur la dernière couche du mur, nous pouvons à présent *identifier les modèles couche par couche*. Ainsi pour chaque couche, nous déterminons le vecteur de paramètres θ :



Où $\theta(z)$ représente le vecteur de paramètres incertains et z est l'élévation de la pièce (ou le numéro de couche). Si on suppose que le vecteur des paramètres s'écrit $(z) = \theta_0 + \Delta\theta$, la partie qui comprend l'incertitude est $\Delta\theta$. Nous en déduisons les deux valeurs extrêmes de la constante du temps et du gain statique du domaine décrivant les incertitudes sur les paramètres du modèle.

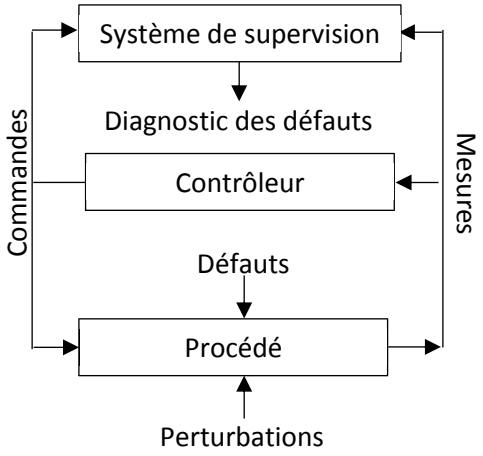


Figure IV.3 – Structure générale d'une application technique de supervision

Pour le cas spécifique des procédés de projection laser, *le niveau de supervision est très important dans la mesure où ces procédés sont en général très complexes et ils sont soumis à diverses instabilités et perturbations* (Voir chapitre I, §I.4.2). Il faut bien faire fonctionner l'ensemble comme un tout cohérent. La cohabitation dans un même procédé d'opérations de différentes natures, au sens de la Figure IV.3, complique bien évidemment le développement des fonctions de supervision. En effet, les perturbations, considérées aussi comme entrées inconnues différentes des défauts, influencent également le processus surveillé. *L'une des difficultés majeures auxquelles le système de supervision est confronté consiste à discriminer l'influence des perturbations de celle des défauts du processus. De plus, le système étant bouclé au moyen de la loi de commande, certains défauts ont tendance à être masqués ou atténués par cette loi de commande et leur détection peut être alors rendue difficile*.

Le nombre important de publications concernant les techniques de supervision montre l'intérêt porté à ces méthodes d'assurance qualité [17]. Si un certain nombre de capteurs sont testés (dans différentes configurations), les travaux ne présentent souvent qu'une recherche par tâtonnement des corrélations signaux/défaut (variations de l'amplitude du signal, fréquences caractéristiques de la transformée de Fourier,…etc). *Les techniques de supervision ont aussi conduit à quelques réalisations, mais une grande partie de leurs succès provient de l'absence de bouclage direct sur le procédé (le système fonctionne en boucle ouverte*). On peut retrouver dans [24] une étude intéressante sur la surveillance en temps réel et l'optimisation du procédé de rechargement laser par vision. On trouve également dans [17] quelques exemples d'application des techniques issues de l'Intelligence Artificielle (la logique floue et les réseaux de neurones) comme des outils d'aide à la décision pour la supervision et le diagnostic des procédés laser.

Cette approche d'intégration des outils de surveillance, de diagnostic et d'aide à la décision au niveau de la supervision est pertinente dans les procédés de projection laser en complément de systèmes primaires de commande en boucle fermée. Cette approche intégrée de la supervision est un domaine de recherche actif, mais en même temps très vaste, nous allons simplement citer ici quelques axes de travaux et perspectives intéressantes qui pourraient être appliquées à notre procédé :

- déterminer comment représenter la connaissance du comportement normal du système ;
- définir les variables potentiellement pertinentes du système à observer ;
- décrire la procédure permettant de détecter les causes de défaillance du procédé (par des capteurs, ou des combinaisons de capteurs et de traitement des données), les évolutions de comportements anormaux (apparition d'un défaut par exemple), la localisation et l'occurrence de ces évolutions ;

La synthèse H_∞ du correcteur décrit ci-dessus peut se formuler comme suit (Problème H_∞ standard):

1. Etant donné $\gamma > 0$, existe-il un compensateur K(s) telle que :

- Le système bouclé $G_{bf}(s)$ soit asymptotiquement stable (tous les pôles du système en boucle fermée sont à partie réelle strictement négative).
- et assure $\left\|G_{bf}(s)\right\|_\infty < \gamma$

2. Si oui, trouver un compensateur K(s) assurant pour le système en boucle fermée les deux propriétés précédentes.

L'ensemble des compensateurs K(s) assurant la plus petite valeur de γ possible seront dits optimaux. Le minimum est noté γ_{opt} et appelé gain (ou atténuation) H_∞ optimal.

Le théorème du petit gain [108] permet alors d'affirmer que le système présenté sur la Figure IV.4 est stable pour toute incertitude vérifiant $\|\Delta G(s)\|_\infty \leq \frac{1}{\gamma}$. C'est pour cette propriété que la commande H_∞ est qualifiée de robuste : il est possible de synthétiser un correcteur stabilisant le *système incertain* entre des dynamiques connues du modèle nominal G(s) et une partie incertaine bornée[79] (perturbation) $\Delta G(s)$.

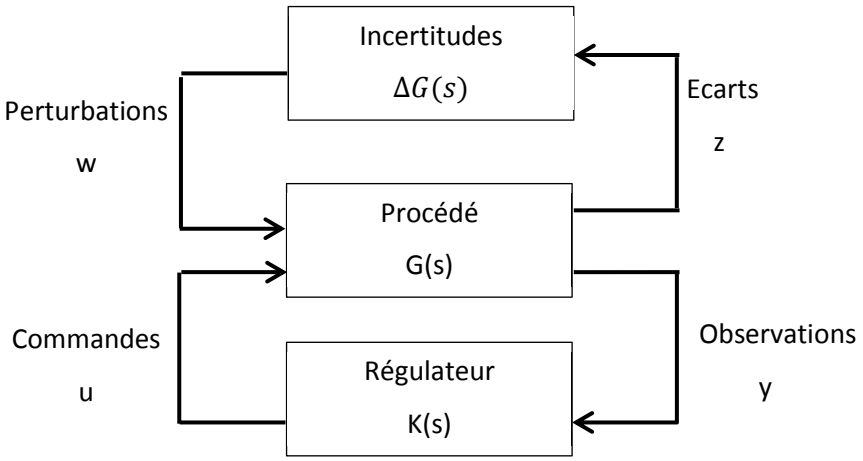


Figure IV.4 – Modèle standard avec incertitude

IV.4.2 Stabilisation et performance robustes

Une autre approche permettant de prendre en compte le caractère non linéaire et non stationnaire d'un système physique et de modéliser les incertitudes qui l'affectent, qu'elles soient structurées (variations paramétriques du système) ou non structurées (dynamique négligées, perturbation extérieurs,….etc). La robustesse consiste à assurer que le système conserve certaines de ses qualités face à ces incertitudes.

En analyse de robustesse, on s'intéresse d'abord à la stabilité du système pour l'ensemble des valeurs des incertitudes à considérer. On parle alors de robustesse en stabilité ou de *stabilité robuste*. On peut également aller plus loin et analyser si le système incertain satisfait un critère de performance pour l'ensemble des incertitudes. On parle alors de robustesse en performance ou de performance robuste. Ces analyses peuvent être menées à deux niveaux :

---

monovariable, on a $\bar{\sigma}(G(j\omega)) = |G(j\omega)|$ et $\|G(s)\|_\infty = \max_{\omega\in\mathcal{R}+}|G(j\omega)|$ est le gain maximal de la réponse fréquentielle $G(j\omega)$ sur l'ensemble des fréquences.

[79] On dispose en général d'une estimation de l'amplitude maximale de $\Delta G(j\omega)$ dans chaque bande de fréquence. Typiquement, cette amplitude est faible aux basses fréquences et croît rapidement dans les hautes fréquences où les dynamiques négligées deviennent prépondérantes.

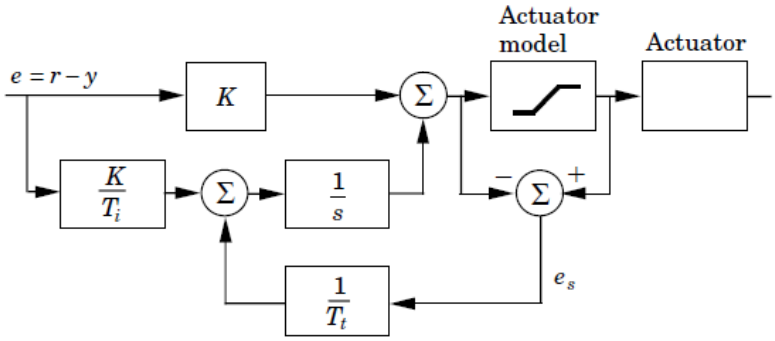


Figure IV.6 – Dispositif anti-wind-up [113]

On peut également réduire les effets indésirables de la limitation du signal de commande en cessant d'intégrer des que la limitation entre en action. Cette manière de faire est d'autant plus facilement mise en œuvre que le régulateur est implanté sous forme numérique et permet également d'atténuer les effets de la décélération des moteurs à la fin de chaque cordon.

IV.5.1.2 Contrôle de la largeur sur un mur

La commande de la largeur a été testée en premier lieu sur un mur. Cela permet en effet, de valider le contrôleur et de valider ses performances couche par couche. Cette géométrie permet aussi de réaliser les échantillons nécessaires à l'analyse métallurgique. De plus cette géométrie est couramment utilisée pour qualifier les nouveaux matériaux en industrie. Cela nous permet donc de faire facilement des comparaisons avec des pièces réalisées en milieu industriel sans contrôle procédé.

Un échantillon de mur de 20 couches construit sans contrôle de procédé, avec une puissance constante (de 400W) est représenté sur la Figure IV.7 (figure du haut). On peut observer en l'absence de contrôle de procédé, une augmentation progressive de la largeur du bain (le bas du mur est plus étroit que la partie supérieure), comme le montre la photo. Cette irrégularité dans la fabrication du mur, résulte du pompage thermique du substrat. En effet, au début de la construction de mur, la forte dissipation de la chaleur par conduction via le substrat, perturbe la fabrication, en provoquant des variations de chaleur qui se répercutent sur la quantité de matière fusionnée et provoque un bain plus étroit. Au fur et à mesure que les couches se succèdent et se trouve éloignées du substrat, il y'a moins de conduction de la chaleur, et le bain s'élargit jusqu'à ce qu'il atteigne une nouvelle valeur d'équilibre (régime quasi-stationnaire). Le problème de de propagation de la chaleur et la non stationnarité est naturellement posé, dans le cadre de l'automatique, comme un problème de rejet de perturbation dans le domaine fréquentiel et plus précisément dans les basses fréquences (phénomène du type thermique). Le rôle du système de commande en boucle fermée est donc de compenser cette variation de chaleur et permet d'obtenir un aspect du mur très appréciable.