



**HAL**  
open science

# Méthodologie de monitoring multiphysique des procédés DED : développement par une démarche expérimentale

Alexia Chabot

## ► To cite this version:

Alexia Chabot. Méthodologie de monitoring multiphysique des procédés DED : développement par une démarche expérimentale. Génie mécanique [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2020. Français. NNT : 2020ECDN0022 . tel-03164132

**HAL Id: tel-03164132**

**<https://theses.hal.science/tel-03164132>**

Submitted on 9 Mar 2021

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

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





*« Le temps n'épargne pas ce que l'on fait sans lui. »*  
François Fayolle (1776-1852), homme de lettres et musicologue Français

## Remerciements

Mes remerciements vont d'abord à Jean-Yves Hascoët et Matthieu Rauch, pour m'avoir offert l'opportunité de faire une thèse sur un sujet de pointe dans un environnement expérimental propice à la recherche. Je souhaite également adresser mes remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail de thèse. Parmi eux, je remercie tout particulièrement les rapporteurs M. Duc et M. Rech pour les retours constructifs qu'ils ont pu formuler.

Je tiens à remercier l'ensemble des collaborateurs industriels et académiques avec lesquels j'ai pu travailler lors de ces trois années : les membres du Laboratoire Commun de Naval Group ainsi que les membres du laboratoire GeM, et plus particulièrement l'équipe de la plateforme RMP. Je citerai personnellement Nans Laroche de l'équipe LS2N et les élèves ingénieurs de l'Option « Matériaux et Procédés » avec qui j'ai étroitement collaboré au cours de ma thèse. J'ajouterai mes camarades Gatien, qui a traversé la thèse en même temps que moi et avec qui j'ai effectué l'ensemble de mes manips, ainsi que mes aînés Julie, Denise et Vincent, qui ont su me guider, grâce à leur expérience du Doctorat. Et enfin, merci infiniment à Guillaume, Adrien, Erwan et Christophe, sans qui cette thèse n'aurait pas pu se faire.

Ma pratique musicale ayant été une soupape de décompression nécessaire à l'accomplissement de ce projet, je remercie l'ensemble des musiciens et professeurs m'ayant offert l'opportunité de m'évader pendant ces 3 ans. Ma reconnaissance va à mes amis proches qui m'ont soutenue, que ce soit de près ou de loin, surtout dans les moments difficiles. Enfin, un très grand merci à ma famille et à mes parents, qui malgré la difficulté de me voir passer par bien des états, n'ont pas failli à me soutenir dans cette aventure.

## Avant-propos

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du laboratoire commun *Joint Laboratory of Marine Technology* (JLMT) regroupant Naval Group et Centrale Nantes. Les travaux de thèse ont été débutés dès la dernière année du cycle Ingénieur à l'école Centrale Nantes, dans le cadre de l'option Doctorat et du stage de fin d'études associé.

# Table des matières

<b>Chapitre 1 : Introduction</b> .....	1
I. Etat de l'art des procédés de Fabrication Additive métallique .....	1
1. Généralités sur la Fabrication Additive.....	1
2. Principales technologies de Fabrication Additive métallique.....	2
3. Procédés DED : paramètres opératoires et problématiques de mise en œuvre .....	4
4. Procédés DED : outils de maîtrise existants.....	6
5. Bilan de l'état de l'art .....	11
II. Positionnement de l'étude.....	14
1. Objectifs et périmètre à l'échelle du laboratoire.....	14
2. Définition du périmètre de l'étude.....	17
3. Objectifs de la thèse .....	20
III. Méthodologie de recherche et plan de la thèse .....	20
1. Méthodologie de recherche .....	20
2. Plan de la thèse.....	22
<b>Chapitre 2 : Développements d'une stratégie de <i>monitoring</i> thermique</b> .....	25
I. Introduction .....	25
II. Etat de l'art des stratégies de monitoring thermique dédiées aux procédés DED .....	25
III. Développement d'une méthode de mesure thermique.....	29
1. Objectifs .....	29
2. Montages expérimentaux et post-traitement des données .....	30
3. Calibration du capteur et qualification de la mesure.....	33
4. Bilan.....	39
IV. Développement d'une boucle de contrôle thermique global.....	40
1. Approche de <i>monitoring</i> thermique global .....	40
2. Choix d'un descripteur thermique .....	41
3. Proposition d'une boucle de contrôle thermique.....	46
V. Application d'une stratégie de monitoring thermique global au procédé WAAM .....	47
1. Introduction.....	47
2. Méthode.....	47
3. Résultats et discussion.....	50
4. Bilan.....	57

VI.	Conclusion .....	57
<b>Chapitre 3 : Développements d'une boucle de contrôle géométrique et mise en œuvre d'une stratégie de <i>monitoring</i> thermo-géométrique.....</b>		
I.	Introduction .....	59
II.	Etat de l'art des stratégies de monitoring géométrique dédiées aux procédés DED.....	59
III.	Développement d'une méthode de mesure géométrique.....	65
1.	Objectifs .....	65
2.	Montages expérimentaux et post-traitement des données .....	66
3.	Qualification de la mesure .....	70
IV.	Développement d'une boucle de contrôle géométrique .....	71
1.	Approche de <i>monitoring</i> géométrique.....	71
2.	Proposition d'une boucle de contrôle géométrique.....	72
3.	Evolution de la hauteur de couche moyenne en fonction de TS.....	73
3.	Bilan .....	75
V.	Application d'une stratégie de monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM ..	75
1.	Introduction.....	75
2.	Méthode.....	76
3.	Résultats et discussion.....	81
4.	Bilan .....	88
VI.	Conclusion .....	89
<b>Chapitre 4 : Investigations du potentiel de contrôle via des mesures sonores et proposition d'une stratégie de <i>monitoring</i> du <i>Stick Out</i> pour le procédé WAAM.....</b>		
I.	Introduction .....	91
II.	Etat de l'art des stratégies de monitoring sonore.....	92
III.	Développement d'une méthode de mesure sonore.....	98
1.	Objectifs .....	98
2.	Choix du capteur.....	98
3.	Montage expérimental et post-traitement .....	100
4.	Qualification de la mesure .....	101
5.	Bilan .....	104
IV.	Application de la mesure sonore à la caractérisation de la signature acoustique du procédé WAAM.....	105
1.	Principe du mode WAAM-CMT .....	105

2.	Analyse du spectre sonore issu d'un dépôt de cordon simple .....	106
3.	Identification des fréquences relevées dans le spectre fréquentiel .....	108
4.	Bilan.....	110
V.	Proposition d'une stratégie de monitoring du Stick Out .....	111
1.	Approche de <i>monitoring</i> sonore visée .....	111
2.	Modèle de contrôle du <i>Stick Out</i> .....	112
3.	Proposition d'une stratégie de <i>monitoring</i> sonore pour le procédé WAAM.....	115
4.	Discussion de l'applicabilité de la méthode au procédé LMD.....	117
VI.	Conclusion .....	117
<b>Chapitre 5 : Développements d'une méthode de mesure ultrasonique vers un <i>monitoring</i> de la santé matière.....</b>		<b>119</b>
I.	Introduction .....	119
II.	Etat de l'art du CND par ultrasons appliqués aux procédés de FA métallique .....	120
III.	Développement d'une méthode de mesure de la santé matière pour les procédés DED 123	
1.	Introduction.....	123
2.	Montages expérimentaux et post-traitement .....	123
3.	Choix de la technique d'imagerie et de la sonde.....	126
4.	Calibration du capteur et qualification de la mesure.....	128
5.	Bilan.....	134
IV.	Perspectives de monitoring de la santé matière des procédés DED.....	134
1.	Approche de <i>monitoring</i> de la santé matière.....	134
2.	Preuve de faisabilité de mesure sur une surface brute de dépôt WAAM.....	136
3.	Perspectives.....	137
V.	Conclusion .....	138
<b>Chapitre 6 : Vers une interaction entre le <i>monitoring</i> et la simulation numérique .....</b>		<b>139</b>
I.	Introduction .....	139
II.	Positionnement du chapitre .....	141
1.	Etat de l'art de la simulation thermomécanique des procédés DED.....	141
2.	Objectifs et cadre du chapitre .....	143
III.	Comparaison des logiciels sur la simulation thermomécanique du procédé WAAM..	146
1.	Introduction.....	146
2.	Présentation du cas d'étude .....	146

3.	Mise en données.....	149
4.	Résultats et discussion.....	151
5.	Bilan.....	156
IV.	Application à la prédiction des temporisations vers une interaction simulation-monitoring.....	157
1.	Introduction.....	157
2.	Présentation du cas d'étude .....	157
3.	Mise en données.....	158
4.	Résultats et discussion.....	159
5.	Bilan.....	160
V.	Vers l'application de la simulation à des composants de grande échelle.....	161
1.	Introduction.....	161
2.	Présentation du cas d'étude .....	161
3.	Mise en données.....	162
4.	Résultats.....	163
5.	Etude des perspectives offertes par le calcul intensif.....	163
6.	Bilan.....	167
VI.	Conclusion.....	167
<b>Chapitre 7 : Conclusions et perspectives.....</b>		<b>169</b>
I.	Synthèses des travaux menés .....	169
1.	Synthèse par chapitre.....	169
2.	Synthèse globale .....	173
II.	Contributions.....	175
III.	Perspectives.....	176
1.	Perspectives pour le <i>monitoring</i> .....	176
2.	Perspectives pour l'amélioration des performances des procédés DED.....	177
<b>Références bibliographiques.....</b>		<b>178</b>

## Liste des Figures

Figure 1-1 : avantages de la Fabrication Additive concernant la réduction des étapes de fabrication. ....	1
Figure 1-2 : exemple d'application de Fabrication Additive multimatériaux avec la méthode FGM [Muller 2013]. ....	2
Figure 1-3 : procédé SLM basé sur la technologie lit de poudre [Muller 2013]. ....	3
Figure 1-4 : procédé LMD basé sur la technologie projection de poudres [Muller 2013].	3
Figure 1-5 : procédé WAAM basé sur la technologie dépôt de fil [Ding 2015]. ....	4
Figure 1-6 : illustration des plage et point de fonctionnement en Fabrication Additive DED. ....	5
Figure 1-7 : principaux phénomènes, paramètres opératoires et caractéristiques de la pièce contrôlés en cours de fabrication DED. ....	7
Figure 1-8 : concept de stratégie de monitoring multiphysiques proposée par Xu et al. [Xu 2016]. ....	9
Figure 1-9 : illustration des différentes approches de simulation numérique en fonction des tailles caractéristiques. ....	10
Figure 1-10 : représentation des éléments constitutifs de la fabrication DED. ....	12
Figure 1-11 : intégration des outils de maîtrise dans un environnement de fabrication additive. ....	15
Figure 1-12 : (a) machine CLAD <sup>®</sup> mise en œuvre pour le procédé LMD, (b) cellule robotisée multiprocédé mise en œuvre pour le procédé WAAM. ....	17
Figure 1-13 : approche de monitoring multiphysique proposée dans ces travaux. ....	19
Figure 1-14 : méthodologie de développement des boucles de monitoring. ....	20
Figure 2-1 : schéma résumant les deux approches de monitoring thermique existantes pour les procédés DED. ....	28
Figure 2-2 : montage expérimental pour le monitoring thermique appliqué au procédé LMD. ....	30
Figure 2-3 : montage expérimental pour le monitoring thermique appliqué au procédé WAAM. ....	31
Figure 2-4 : exemple d'image thermique in-situ acquise par la caméra thermique infrarouge. ....	31
Figure 2-5 : mise en évidence d'une limitation de la méthode de mesure pour les dépôts WAAM en alliage d'aluminium. ....	32
Figure 2-6 : conséquence d'une erreur de 1% sur l'émissivité sur les mesures optiques en fonction de la température et de la longueur d'onde [Mattei 2005]. ....	35
Figure 2-7 : montage expérimental pour la calibration de la caméra thermique pour le procédé WAAM. ....	37
Figure 2-8 : évolution des écarts entre les mesures infrarouges et thermocouple pour la détermination de l'émissivité pour l'acier duplex déposé avec le procédé WAAM. ....	37
Figure 2-9 : illustration du thermocouple inséré dans le mur lors de la calibration de l'émissivité pour le procédé LMD. ....	38

Figure 2-10 : Evolution des écarts entre les mesures infrarouges et thermocouple pour la détermination de l'émissivité pour l'acier duplex déposé avec le procédé LMD.....	38
Figure 2-11 : test de répétabilité de mesure thermique en cours de dépôt WAAM. Etude de la température en fin de refroidissement à chaque couche.....	39
Figure 2-12 : approche de monitoring thermique global proposée dans ces travaux.....	40
Figure 2-13 : mise en évidence de la $ZHT_{1000^{\circ}C}$ au sein de la pièce en cours de dépôt LMD.....	42
Figure 2-14 : détail du traitement d'image pour obtenir les caractéristiques de la $ZHT_{1000^{\circ}C}$ .....	42
Figure 2-15 : murs fabriqués dans le cadre de l'étude de la grandeur physique $ZHT_{1000^{\circ}C}$ . (a) mur A (b) mur B.....	43
Figure 2-16 : évolution de la longueur de la $ZHT_{1000^{\circ}C}$ en cours de fabrication des murs A et B.....	43
Figure 2-17 : illustrations de l'évolution de $ZHT$ en cours de fabrication des murs A et B.....	44
Figure 2-18 : estimation du SO à la fin des deux fabrications, (a) mur A, (b) mur B.....	45
Figure 2-19 : évolution typique de la température maximale mesurée par la caméra thermique en cours de fabrication WAAM.....	45
Figure 2-20 : montage expérimental pour le monitoring thermique appliqué au procédé WAAM.....	48
Figure 2-21 : algorithme de la stratégie de monitoring thermique développée dans ces travaux.....	49
Figure 2-22 : murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM. (a) mur fabriqué sans contrôle, (b) mur fabriqué avec contrôle de la température d'interpasse.....	50
Figure 2-23 : (a) évolution de $T_{int}$ mesurée et (b) évolution du temps d'attente entre chaque couche, pour les deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM.....	51
Figure 2-24 : macrographies des deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM. (a) mur non contrôlé, (b) mur contrôlé.....	52
Figure 2-25 : dimensions des couches pour les deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM. (a) Hauteur de couche, (b) Largeur effective de couche.....	53
Figure 2-26 : évolution de la proportion de Ferrite le long des deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM.....	54
Figure 2-27 : diagramme de phase pseudo-binaire Cr-Ni à l'équilibre, issu d'une coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni à 70% massique de fer [Maetz 2014].....	55
Figure 2-28 : liens entre (a) les évolutions de proportion de Ferrite et (b) les temps de maintien à haute température pour les deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM.....	56

Figure 3-1 : schéma résumant les deux approches de monitoring géométrique existantes pour les procédés DED. ....	62
Figure 3-2 : variations de hauteur d'une couche p en cours de fabrication.....	64
Figure 3-3 : illustration des variations hauteurs de couche en cours de fabrication.....	65
Figure 3-4 : montage expérimental pour le monitoring géométrique appliqué au procédé LMD.....	66
Figure 3-5 : montage expérimental pour le monitoring thermique appliqué au procédé WAAM.....	67
Figure 3-6 : principe de prise de mesure géométrique.....	67
Figure 3-7 : exemple de données géométriques issues de scan in-situ d'un mur monocordon WAAM : profil 2D avec les valeurs maximales calculées le long de l'axe X. ....	68
Figure 3-8 : traitement des données pour obtenir la hauteur de la pièce à partir de la mesure géométrique. ....	68
Figure 3-9 : changement d'origine de la mesure pour obtenir la hauteur de la pièce dans le cas d'un substrat hors zone de mesure du capteur.....	69
Figure 3-10 : spécimen sélectionné pour l'étude de justesse de la mesure géométrique. ....	70
Figure 3-11 : résultats de l'étude de répétabilité et de justesse de la mesure géométrique.....	70
Figure 3-12 : approche de monitoring géométrique proposée dans ces travaux. ....	71
Figure 3-13 : abaque de choix de TS en fonction de la hauteur de couche moyenne.....	74
Figure 3-14 : Variation de largeur de couche en fonction de la vitesse d'avance. ....	74
Figure 3-15 : montage expérimental pour le monitoring thermique et géométrique appliqué au procédé WAAM. ....	77
Figure 3-16 : algorithme de la stratégie de monitoring thermo-géométrique développée dans ces travaux.....	78
Figure 3-17 : modèle de contrôle mis en œuvre pour le cas d'application de monitoring géométrique au WAAM.....	80
Figure 3-18 : illustration des trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM.....	81
Figure 3-19 : (a) températures d'interpasse mesurées, (b) temps d'attente entre couches pour les trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM. ....	82
Figure 3-20 : (a) évolution des écarts entre la hauteur mesurée et la hauteur cible, (b) évolution de TS pour les trois fabrications du cas d'application de la stratégie de monitoring thermo-géométrique. ....	83
Figure 3-21 : macrographies des trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM. (a) mur non contrôlé, (b) mur avec contrôle thermique, (c) mur avec contrôle thermo-géométrique.....	84

Figure 3-22 : évolution des caractéristiques géométriques des trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM. (a) hauteur de couche, (b) largeur effective de couche.....	85
Figure 3-23 : évolution de la proportion de Ferrite le long des trois murs fabriqués pour l'application de monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM. ....	87
Figure 4-1 : illustration des différents effets du Stick Out.....	91
Figure 4-2: schéma récapitulant les deux approches de monitoring sonore des procédés relevées dans la littérature.....	93
Figure 4-3 : mise en évidence des sons générés par l'arc électrique et évolution de l'intensité de soudage correspondante [Horvat 2011]. ....	95
Figure 4-4 : identification de la fréquence de dépose de goutte du procédé GMAW dans les mesures sonores d'un microphone piézoélectrique [Grad 2004].....	95
Figure 4-5 : corrélation entre l'amplitude du signal mesuré par un microphone statique et le Stick Out – WEL - pour le procédé GMAW [Grad 2004]. ....	95
Figure 4-6 : exemple typique de diagramme polaire de directivité cardioïde. ....	100
Figure 4-7 : montage expérimental pour le monitoring sonore du procédé WAAM.....	100
Figure 4-8 : schématisation du principe de Transformée de Fourier discrète dans le cas d'un signal périodique.....	102
Figure 4-9 : illustration des différentes positions de microphone dynamique testées. (a) Position de référence, (b) position haute, (c) position aléatoire. ....	104
Figure 4-10 : descriptions des différentes phases de fonctionnement du mode CMT...	105
Figure 4-11 : (a) signal temporel brut enregistré en cours de dépôt WAAM-CMT et (b) FFT associée. ....	106
Figure 4-12 : zoom sur les basses fréquences de la FFT d'un signal enregistré lors d'un dépôt WAAM-CMT de l'acier duplex en conditions de dépôt de référence.....	107
Figure 4-13 : comparaison des FFT des enregistrements en conditions normales de dépôt ainsi qu'en configuration de « pré-gaz ». ....	108
Figure 4-14 : zoom sur 100ms du signal temporel brut enregistré en cours de dépôt WAAM-CMT.....	109
Figure 4-15 : caractérisation de la signature acoustique du mode CMT dans le cas d'étude considéré.....	110
Figure 4-16 : approche de monitoring sonore proposée dans ces travaux.....	111
Figure 4-17 : illustration de deux sticks out testés pour développer le modèle de contrôle sonore. (a) SO de 13 mm, (b) SO de 33 mm. ....	112
Figure 4-18 : modèle reliant le descripteur sonore fréquentiel au Stick Out. ....	113
Figure 4-19 : mur monocordon fabriqué pour valider le modèle de contrôle sonore.....	113
Figure 4-20 : comparaison du modèle de contrôle du SO avec des mesures sonores pour un mur monocordon.....	114
Figure 4-21 : algorithme de la stratégie de monitoring sonore proposée dans ces travaux.....	116

Figure 4-22 : abaque reliant hauteur de couche avec le SO et le descripteur fréquentiel. .....	116
Figure 4-23 : étapes d'adaptation de la méthode de monitoring sonore à d'autres procédés.....	117
Figure 5-1 : montages de sonde envisagés pour un contrôle in-situ du WAAM. a) mesure au-dessus du mur, b) mesure latérale du mur, c) mesure par-dessous le substrat [Knezović 2018]......	122
Figure 5-2 : (a) montage de la sonde sur un water wedge et (b) montage expérimental dans le cadre de l'application au procédé WAAM. ....	124
Figure 5-3 : (a) exemple de scan ultrasonique 3D d'un spécimen en alliage d'aluminium fabriqué par le procédé WAAM, (b) vue de dessus du spécimen – plan XZ.....	125
Figure 5-4 : calcul de la taille du défaut détectée par la méthode PAUT dans le cas général.....	125
Figure 5-5 : (a) exemple de scan ultrasonique pour l'inspection avec la sonde 10 MHz d'une pale d'hélice en alliage d'aluminium fabriquée par le procédé WAAM, (b) vue de l'hélice complète, (c) coupe dans le plan XZ d'une pale. ....	127
Figure 5-6 : (a) exemple de scan ultrasonique pour l'inspection avec la sonde 18,5 MHz d'un mur en acier inoxydable 316 L fabriqué par le procédé LMD, (b) vue du mur dans le plan XY.....	128
Figure 5-7 : bloc en alliage d'aluminium réalisé pour la calibration de la technique TFM.....	129
Figure 5-8 : montage expérimental pour les inspections du bloc de calibration.....	129
Figure 5-9 : scan ultrasonique de la première série de défauts SDH du bloc de calibration – profondeur 10 mm. ....	130
Figure 5-10 : abaque de calibration pour la configuration d'intérêt.....	130
Figure 5-11 : mur multicordon en alliage d'aluminium WAAM sélectionné pour la qualification de la méthode CND. ....	131
Figure 5-12 : (a) radiographie de la porosité n°1, (b) radiographie de la porosité n°2.	132
Figure 5-13 : (a) images ultrasoniques de la porosité n°1, (b) images ultrasoniques de la porosité n°2, (c) positionnement de la mesure.....	132
Figure 5-14 : illustration des résultats de répétabilité dans l'abaque de calibration de la méthode CND. ....	133
Figure 5-15 : approche de monitoring de la santé matière proposée dans ces travaux.	135
Figure 5-16 : mur multicordon en alliage d'aluminium WAAM. (a) vue de face, (b) vue arrière.....	136
Figure 5-17 : inspection depuis la surface brute du mur multicordon WAAM considéré dans ces travaux. ....	137
Figure 6-1 : intégration visée de la simulation numérique dans un environnement de fabrication DED.....	139
Figure 6-2 : démarche d'intégration d'un outil numérique dans un environnement de Fabrication Additive DED. ....	140

Figure 6-3 : logiciels identifiés pour la simulation numérique des procédés de Fabrication Additive métallique.....	142
Figure 6-4 : illustration de la méthode de sélection de temporisations par Montevecchi et al. [Montevecchi 2018]. .....	143
Figure 6-5 : processus de simulation numérique avec (a) Simufact Welding, (b) NetFabb Local Simulation. ....	144
Figure 6-6 : schématisation du cas d'étude de simulation thermomécanique du procédé WAAM.....	147
Figure 6-7 : montage expérimental de la fabrication du mur considéré pour la comparaison des logiciels. ....	148
Figure 6-8 : mur multi-cordons fabriqué en WAAM pour la comparaison des logiciels. ....	148
Figure 6-9 : conditions aux limites mécaniques des différents modèles (a) SW, (b) NLS. ....	150
Figure 6-10 : illustration comparaison des Zone Affectée Thermiquement (ZAT) et Zone Fondue (ZF) numériques et expérimentales pour validation de la modélisation de la source de chaleur équivalente. ....	151
Figure 6-11 : comparaison des évolutions de température à la 6 <sup>e</sup> couche déposée entre les simulations et les données de la caméra thermique. ....	152
Figure 6-12 : (a) comparaison des évolutions de température dans le substrat entre les simulations et les données thermocouple TC1, zoom sur les données expérimentales au (b) pic de la couche 11, (c) pic de la couche 12. ....	154
Figure 6-13 : comparaison du déplacement d'un point du substrat simulé et mesuré en cours de fabrication.....	156
Figure 6-14 : mur monocordon WAAM considéré pour l'application de la simulation numérique à la prédiction des temporisations. ....	158
Figure 6-15 : montage expérimental pour l'acquisition des données thermiques en cours de fabrication du mur considéré pour l'application de la simulation numérique à la prédiction des temporisations. ....	158
Figure 6-16 : comparaison des températures d'interpasse numériques avec les données expérimentales.....	159
Figure 6-17 : vues de face et de côté d'une pale d'hélice navale fabriquée à Centrale Nantes. ....	161
Figure 6-18 : modèle CAO de la pale d'hélice navale considérée dans ce cas d'étude. La section simulée dans ces travaux est illustrée en rouge.....	162
Figure 6-19 : champs thermiques en cours de dépôt de la 9 <sup>e</sup> couche de la pale.....	163
Figure 6-20: identification des coefficients du modèle de prédiction du temps de calcul en fonction du nombre de cœurs, pour la simulation de la 1 <sup>e</sup> couche de la pale.....	165
Figure 6-21 : comparaison des temps de calcul réels avec le modèle pour la simulation de la 1 <sup>e</sup> couche de la pale.....	166

Figure 7-1 : intégration des outils de maîtrise dans un environnement de fabrication additive. ....	170
Figure 7-2 : instrumentation d'un environnement de Fabrication Additive DED pour mettre en œuvre simultanément les différentes boucles de contrôle développées dans ces travaux. ....	172
Figure 7-3 : algorithme complet de la stratégie de monitoring multiphysique développée dans ces travaux. ....	173
Figure 7-4 : proposition de hiérarchisation des éléments constitutifs du procédé WAAM. ....	174

## Liste des Tableaux

Tableau 2-1 : liste des paramètres à renseigner pour la calibration de la caméra thermique FLIR A615.....	33
Tableau 2-2 : paramètres opératoires utilisés pour l'étude de la grandeur physique ZHT.....	43
Tableau 2-3 : boucle de contrôle thermique développée dans ces travaux. ....	46
Tableau 2-4 : paramètres opératoires utilisés dans le cas d'application du monitoring thermique au procédé WAAM.....	47
Tableau 2-5 : composition du fil d'acier duplex 2209 utilisé dans cette étude. ....	48
Tableau 2-6 : paramètres de calibration de la caméra thermique infrarouge pour le contrôle thermique.....	48
Tableau 3-1 : Comparatif des différentes méthodes de mesures relevées dans la littérature.....	60
Tableau 3-2 : boucle de contrôle géométrique développée dans ces travaux.....	73
Tableau 3-3 : paramètres opératoires utilisés dans le cas d'application du monitoring thermique au procédé WAAM.....	76
Tableau 3-4 : composition du fil d'acier duplex 2209 utilisé dans cette étude.....	76
Tableau 3-5 : caractéristiques géométriques finales des trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM.....	81
Tableau 3-6 : moyennes et écarts types des dimensions des couches des différentes fabrications.....	86
Tableau 4-1 : détail des différentes techniques de contrôle des procédés de soudage par des moyens sonores. ....	97
Tableau 4-2 : Comparaison des caractéristiques générales des microphones statique et dynamique.....	99
Tableau 4-3 : Caractéristiques du microphone dynamique SM 57.....	100
Tableau 4-4 : paramètres opératoires utilisés pour les travaux de monitoring sonore appliqués au procédé WAAM.....	102
Tableau 4-5 : résultats de l'étude de répétabilité des fréquences mesurées.....	103
Tableau 4-6 : résultats de l'étude de l'influence de la position du microphone dynamique.....	103
Tableau 4-7 : paramètres opératoires utilisés pour le développement du modèle de contrôle sonore. ....	112
Tableau 4-8 : Récapitulation des différentes valeurs de Stick Out sélectionnées pour développer le modèle de contrôle sonore. ....	112
Tableau 4-9 : boucle de contrôle sonore proposée dans ces travaux.....	115
Tableau 5-1 : Récapitulatif des applications des méthodes ultrasoniques aux procédés de Fabrication Additive métallique.....	121
Tableau 5-2 : sondes sélectionnées pour l'application du contrôle ultrasonique aux procédés LMD et WAAM.....	127

Tableau 5-3 : résultats de dimensionnement des deux porosités d'intérêt avec les méthodes UT et RT.....	133
Tableau 5-4 : résultats des résultats de répétabilité de la méthode CND.....	134
Tableau 5-5 : caractéristiques de la sonde 5 MHz utilisée pour les perspectives de monitoring de la santé matière.....	136
Tableau 6-1 : caractéristiques des logiciels considérés.....	146
Tableau 6-2 : caractéristiques du mur considéré pour la comparaison des logiciels sur la simulation thermomécanique du procédé WAAM.....	147
Tableau 6-3 : paramètres opératoires utilisés pour fabriquer le mur monocordon WAAM considéré pour la comparaison des logiciels.....	147
Tableau 6-4 : paramètres de modélisation de la source de chaleur équivalente.....	149
Tableau 6-5 : conditions aux limites thermiques utilisées dans cette étude.....	150
Tableau 6-6 : temps de calcul pour les différentes simulations du cas d'étude WAAM.....	151
Tableau 6-7 : dimensions des ZAT et ZF pour les résultats numériques et relevés sur macrographies.....	152
Tableau 6-8 : caractéristiques du mur considéré pour l'application de la simulation numérique à la prédiction des temporisations.....	157
Tableau 6-9 : paramètres opératoires utilisés pour fabriquer le mur considéré pour l'application de la simulation numérique à la prédiction des temporisations.....	157
Tableau 6-10 : récapitulatif des différentes modélisations testées pour modéliser le cas d'étude.....	159
Tableau 6-11 : modèle numérique utilisé pour simuler le cas d'étude grande échelle..	162

## Liste des Abréviations

CCD	<i>Charged Coupled Device</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CGS	Centre de Gravité Spectrale
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CN	Commande Numérique
CND	Contrôle Non Destructif
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
DSP	Densité Spectrale de Puissance
EA	Emission Acoustique
EF	Eléments Finis
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GMAW	<i>Gas-Metal Arc Welding</i>
IR	Infrarouge
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i>
MD	Microphone Dynamique
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MS	Microphone Statique
PAUT	<i>Phased-Array Ultrasonic Testing</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PID	Proportionnel, Intégral, Dérivé
PWI	<i>Plane Wave Imaging</i>
PZ	Piézoélectrique
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RT	<i>Radiography Testing</i>
SDH	<i>Side-Drilled Hole</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SO	<i>Stick Out</i>
STD	<i>Standard Deviation</i>
TCP	<i>Tool Centre Point</i>
TFM	<i>Total Focusing Method</i>
TS	<i>Travel Speed</i>
UT	<i>Ultrasonic Testing</i>
VOF	<i>Volume Of Fluid</i>
WAAM	<i>Wire-Arc Additive Manufacturing</i>
WLAM	<i>Wire-Laser Additive Manufacturing</i>
WFS	<i>Wire Feed Speed</i>
ZHT	Zone à Haute Température



# Chapitre 1 : Introduction

## I. Etat de l'art des procédés de Fabrication Additive métallique

### 1. Généralités sur la Fabrication Additive

La Fabrication Additive (FA) regroupe l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, par ajout de matière par couches successives, un objet physique à partir d'une maquette numérique 3D. Ces méthodes s'opposent aux procédés soustractifs, tels que l'usinage, ou aux procédés de mise en forme tels que le moulage, le formage ou l'emboutissage. Apparus dans les années 1980, les procédés de FA étaient initialement dédiés au prototypage rapide via l'impression 3D polymère [Bourell 2009, Rivette 2013]. Les technologies ont été graduellement améliorées et étendues à d'autres familles de matériaux – céramiques, métaux – et permettent aujourd'hui de réaliser des pièces fonctionnelles répondant aux spécifications d'un cahier des charges [Moussion 2017].

La FA présente de nombreux avantages et possibilités par rapport aux procédés usuels. Nous pouvons notamment distinguer les apports suivants :

- **la liberté de conception** : la FA s'affranchit des règles de fabrication des procédés de fabrication classiques – règles de démoulage, accessibilité outil en usinage, etc – et offre ainsi de nouvelles possibilités de réaliser des géométries complexes ou issues d'optimisations topologiques ;
- **la simplification des assemblages** : dans le prolongement de la liberté de conception, des pièces jusqu'alors issues de l'assemblage de plusieurs composants peuvent être obtenues directement d'un seul tenant par FA, comme illustré en Figure 1-1. Cette simplification peut, dans certains cas, réduire les temps de fabrication [Williams 2016] ;

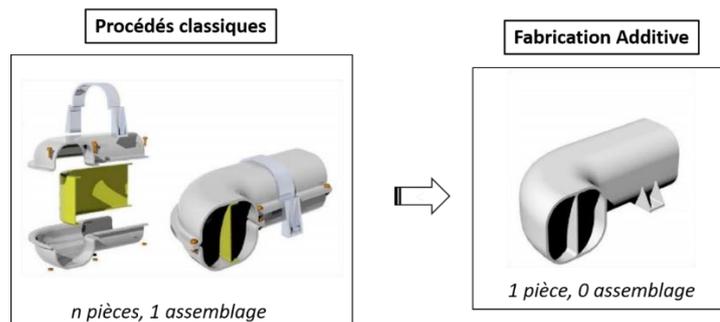


Figure 1-1 : avantages de la Fabrication Additive concernant la réduction des étapes de fabrication.

- **la réduction des pertes de matière** : de par les deux avantages précédemment cités, des pièces auparavant obtenues uniquement par usinage dans la masse peuvent alors être réalisées en partie ou entièrement par FA. Les pertes de matière éventuelle se limitent donc aux opérations de parachèvement en fin de fabrication pour obtenir des surfaces fonctionnelles. Le recours à la fabrication hybride – combinaison des procédés soustractifs et additifs – permet également de diminuer le taux de rebut en effectuant des opérations d’usinage sur une pièce ayant un défaut et de reprendre la fabrication additive [Rivette 2013]. Dans le prolongement de la réduction des pertes de matière, la FA offre des possibilités de réparation de pièces, permettant d’augmenter leur durée de vie [Touzé 2019] ;
- **la fabrication de pièces multimatériaux à gradient fonctionnel** : les procédés basés sur la technologie projection de poudres permettent la réalisation de pièces multimatériaux, ou *Functionally Graded Material* (FGM) [Muller 2013, Loh 2018]. L’utilisation de telles méthodes de fabrication permet d’adapter localement la composition et les matériaux déposés afin de répondre aux fonctions de certaines surfaces ou zones de la pièce, comme illustré en Figure 1-2.

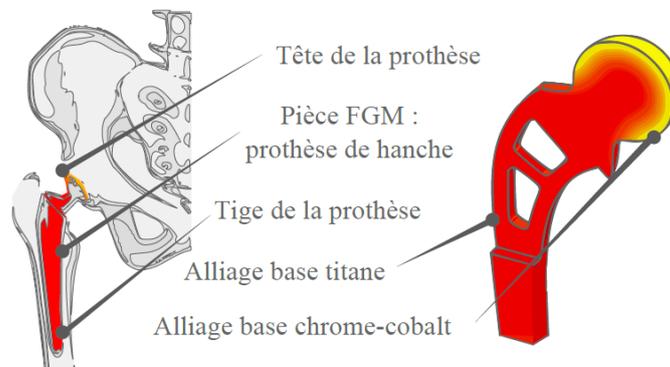


Figure 1-2 : exemple d’application de Fabrication Additive multimatériaux avec la méthode FGM [Muller 2013].

## 2. Principales technologies de Fabrication Additive métallique

Il existe trois principales familles de procédés de Fabrication Additive métallique : la technologie par lit de poudre, la technologie par projection de poudres et la technologie par dépôt de fil. Ces trois technologies vont être successivement décrites ci-après.

La fabrication par lit de poudre est basée sur une agglomération locale d’une fine couche de poudre à l’aide d’une source d’énergie de type faisceau d’électrons ou laser. Les principaux procédés correspondants sont le *Selective Laser Melting* (SLM) [Yap 2015], schématisé en Figure 1-3, le *Selective Laser Sintering* [Prakash 2018] ou l’*Electron Beam Melting* [Körner 2016].

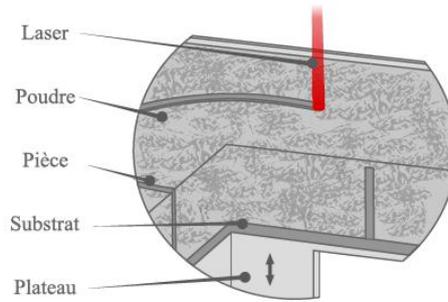


Figure 1-3 : procédé SLM basé sur la technologie lit de poudre [Muller 2013].

Concernant la technologie projection de poudres, le procédé *Laser Metal Deposition* (LMD) permet de fabriquer des pièces de faible épaisseur et à forte valeur ajoutée [Yap 2015]. Par ailleurs, le LMD permet la fabrication multimatériaux FGM [Muller 2013] et la réparation de pièce [Touzé 2019]. Le principe du procédé LMD est schématisé en Figure 1-4 : la poudre de métal est transportée par un flux de gaz inerte vers une tête de projection et finalement fusionnée par un laser. Un gaz de protection est apporté pour protéger localement le bain de fusion de l'oxydation. Une enceinte contrôlée peut également être utilisée pour améliorer cette protection [Pillot 2016]. Les domaines privilégiés d'application du LMD sont l'aérospatiale et l'aéronautique, pour la réalisation de pièces avec une complexité géométrique importante et le médical avec l'utilisation de la technologie FGM [Bandyopadhyay 2018].

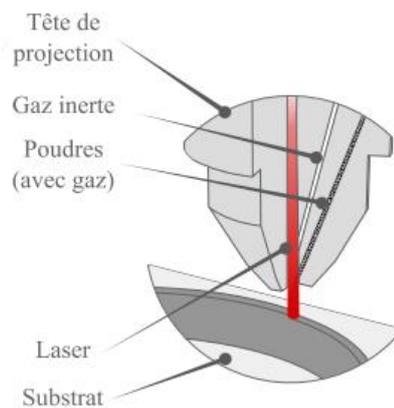


Figure 1-4 : procédé LMD basé sur la technologie projection de poudres [Muller 2013].

Enfin, les procédés basés sur la technologie dépôt de fil sont principalement dédiés à la fabrication de composants de structures de grandes dimensions – supérieures au mètre [Kerninon 2008]. La technologie dépôt de fil peut être mise en œuvre de plusieurs manières. D'une part, nous pouvons distinguer des procédés de dépôt de fil basés sur différentes sources de chaleur : un arc électrique dans le cas du procédé *Wire-Arc Additive Manufacturing* (WAAM) [Williams 2016, Quérard 2019], un laser dans le cas du *Wire-Laser Additive Manufacturing* (WLAM) [Ding 2015] et plus rarement un faisceau d'électrons dans le cas du procédé *Electron Beam FreeForm Fabrication*

[Taminger 2006]. Concernant le procédé WAAM, différentes techniques de soudage peuvent être employées, principalement le soudage *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), le soudage *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) et le soudage *Plasma Arc Welding* (PAW) [Ding 2015]. Le plus souvent, le procédé WAAM est mis en œuvre avec la technologie GMAW, illustrée en Figure 1-5 [Williams 2016]. Le fil de métal d'apport, servant également d'électrode, est fusionné par le biais d'un arc électrique. De la même manière qu'en LMD, un gaz de protection est apporté localement pour protéger le bain de fusion. Les principaux domaines d'application du procédé WAAM sont le naval, l'aérospatiale et l'aéronautique [Williams 2016].

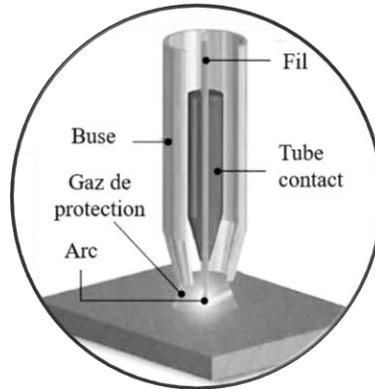


Figure 1-5 : procédé WAAM basé sur la technologie dépôt de fil [Ding 2015].

Les deux précédentes technologies, LMD et WAAM, sont basées sur le dépôt de matière cordon par cordon. L'ensemble de ces procédés est désigné sous le nom de *Direct Energy Deposition* (DED) et vont faire l'objet de ces travaux.

### 3. Procédés DED : paramètres opératoires et problématiques de mise en œuvre

Malgré les différences de source de chaleur et de forme de métal d'apport, les mises en œuvre des deux technologies DED présentées précédemment sont similaires. En particulier, les principaux paramètres opératoires à considérer en Fabrication Additive DED sont :

- **la puissance** de la source de chaleur, notée  $P_{\text{laser}}$  ou  $P_{\text{arc}}$ . Dans le cas du WAAM, la puissance est reliée au produit de la tension et de l'intensité de l'arc électrique ;
- **la vitesse d'avance** du système de déplacement, notée  $TS$  ;
- **le débit de matière**, représenté par le débit de poudre, noté  $Q_{\text{poudre}}$ , dans le cas du LMD et la vitesse de dévidage du fil, notée  $WFS$ , dans le cas du WAAM ;
- **le *Stick Out* (SO)**, ou distance de travail entre l'effecteur et la pièce.

Les trois paramètres {puissance, vitesse d'avance et débit matière} sont directement commandés par la Commande Numérique (CN) de la machine ou du robot. Ces paramètres étant couplés physiquement, leur combinaison est contrainte afin de déposer un cordon stable géométriquement [Quérard 2019]. Par ailleurs, le SO est un paramètre indirect qui résulte de la différence entre la position de l'effecteur, commandée par la CN et la hauteur de la pièce, dépendante de la combinaison des trois premiers paramètres. Le SO impacte directement la fusion de la matière et les conditions de dépôt, notamment le point focal laser, dans le cas du LMD, ou la longueur d'arc dans le cas du WAAM [Ding 2016, Haley 2019]. Ainsi, la mise en œuvre d'un trio de paramètres {puissance, vitesse d'avance, débit matière} optimal couplé à un SO incorrect peut donner lieu à des dépôts de matière instables [Heralic 2012, Xiong 2014].

Pour un matériau donné, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des paramètres opératoires admissibles, appelé plage de fonctionnement du procédé à travers des études paramétriques, expérimentales ou numériques [Quérard 2019, Gockel 2019]. Pour fabriquer une pièce, une combinaison de paramètres opératoires est plus particulièrement choisie à l'intérieur de la plage de fonctionnement pour déposer des cordons d'une certaine forme à chaque couche. Cette combinaison optimale est appelée point de fonctionnement. Les notions de plage et point de fonctionnement sont toutes deux schématisées en Figure 1-6. La détermination des hauteurs de couche admissibles et des points de fonctionnement correspondants est souvent réalisée à travers la fabrication de géométries simples, comme des murs monocordons [Quérard 2019].

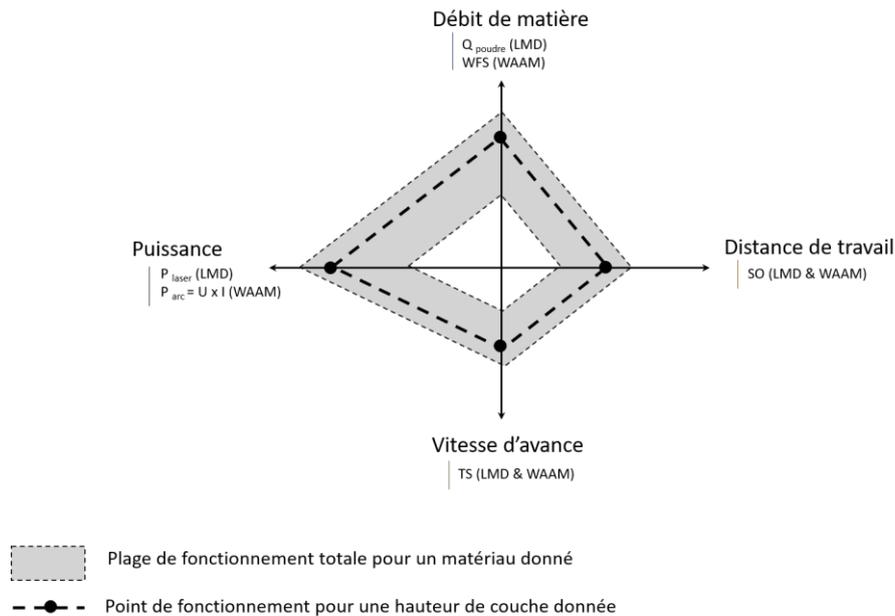


Figure 1-6 : illustration des plage et point de fonctionnement en Fabrication Additive DED.

Dans le processus d'élaboration de la stratégie de fabrication d'une pièce en DED, le point de fonctionnement est déterminé en amont de la fabrication, en fonction de la hauteur de référence à déposer à chaque couche. Si possible, les paramètres opératoires sont fixés constants tout au long de la fabrication, afin de déposer la même hauteur à chaque couche et de garantir une hauteur finale conforme aux exigences du cahier des charges. Cependant, les procédés DED sont complexes. En particulier, suivant les pièces à fabriquer, les phénomènes thermiques mis en jeu impactent le comportement du matériau et modifient les caractéristiques du dépôt en cours de fabrication [Purtonen 2014, Quaranta 2020]. Ainsi, suivant le composant considéré, des paramètres opératoires constants peuvent faire sortir le procédé de sa plage de fonctionnement, à cause de dérives apparues en cours de fabrication. Actuellement, les procédés DED étant majoritairement mis en œuvre en boucle ouverte, les variations du point de fonctionnement ne sont pas appréhendées : une méthode d'essai-erreur est souvent adoptée afin de déterminer les paramètres opératoires optimaux pour un nouveau cas d'application [Song 2012]. Or, cette méthode essai-erreur est coûteuse en temps et en matière, et se révèle inappropriée dans le cas d'une mise au point du procédé pour les fabrications en petites séries ou de pièces de grandes échelles [Bandyopadhyay 2018].

#### 4. Procédés DED : outils de maîtrise existants

Face aux problématiques de mise en œuvre décrites dans la section précédente, des solutions ont été proposées dans la littérature pour maîtriser les fabrications DED et assurer leur aboutissement systématique vers des pièces finales conformes au cahier des charges fixé. Deux approches sont principalement investiguées [Tapia 2014] :

- le **monitoring**, ou **contrôle en temps réel**, qui, au moyen de capteurs, va recueillir des informations sur l'état du procédé ou de la pièce en cours de fabrication et permettre d'apporter une correction à la stratégie de fabrication en cas de dérive(s) détectée(s) ;
- le **simulation numérique**, permettant de prédire le comportement thermomécanique de la pièce en cours de fabrication et d'optimiser la stratégie de fabrication en amont afin d'anticiper et de limiter l'occurrence de situations critiques.

##### 4.1. *Etat de l'art sur le monitoring des procédés DED*

L'approche expérimentale du *monitoring* constitue un premier axe de maîtrise des procédés DED. Cette approche permet de détecter en temps réel des dérives par rapport à la croissance de la pièce souhaitée et d'apporter des modifications à la stratégie de fabrication pour limiter, voire corriger, les effets de ces déviations sur la pièce finale. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir une connaissance suffisante du fonctionnement des procédés concernés pour identifier les phénomènes mis en jeu en cours de fabrication et de développer des moyens expérimentaux capables de les capturer.

Les principaux phénomènes, paramètres opératoires et caractéristiques des pièces faisant l'objet d'un contrôle dans la littérature sont détaillés en Figure 1-7. Nous pouvons notamment relever :

- le contrôle des **champs thermiques**, que ce soit à l'échelle de la pièce ou du bain de fusion, effectué majoritairement avec des capteurs optiques [Karnati 2013, Smurov 2013, Farshidianfar 2016, Wu 2017, Yang 2017] .
- le contrôle de la **géométrie des cordons** déposés, mené avec des capteurs optiques ou laser [Heralic 2012, Xiong 2014, Xu 2016, Garmendia 2018, Han 2018] .
- à moindre échelle, des stratégies de contrôle du **débit de poudre** dans le cas du LMD, avec des capteurs optiques [Tang 2011, Smurov 2013, Muller 2013] .
- de premières pistes de contrôle de la **santé matière** de la pièce via des moyens de contrôle non-destructifs [Gaja 2017, Knezović 2018, Millon 2018] .
- des investigations concernant le contrôle *in-situ* des **déformations** induites par les champs thermiques au moyen des capteurs laser ou des techniques de corrélation d'images [Denlinger 2015, Heigel 2015, Biegler 2018].

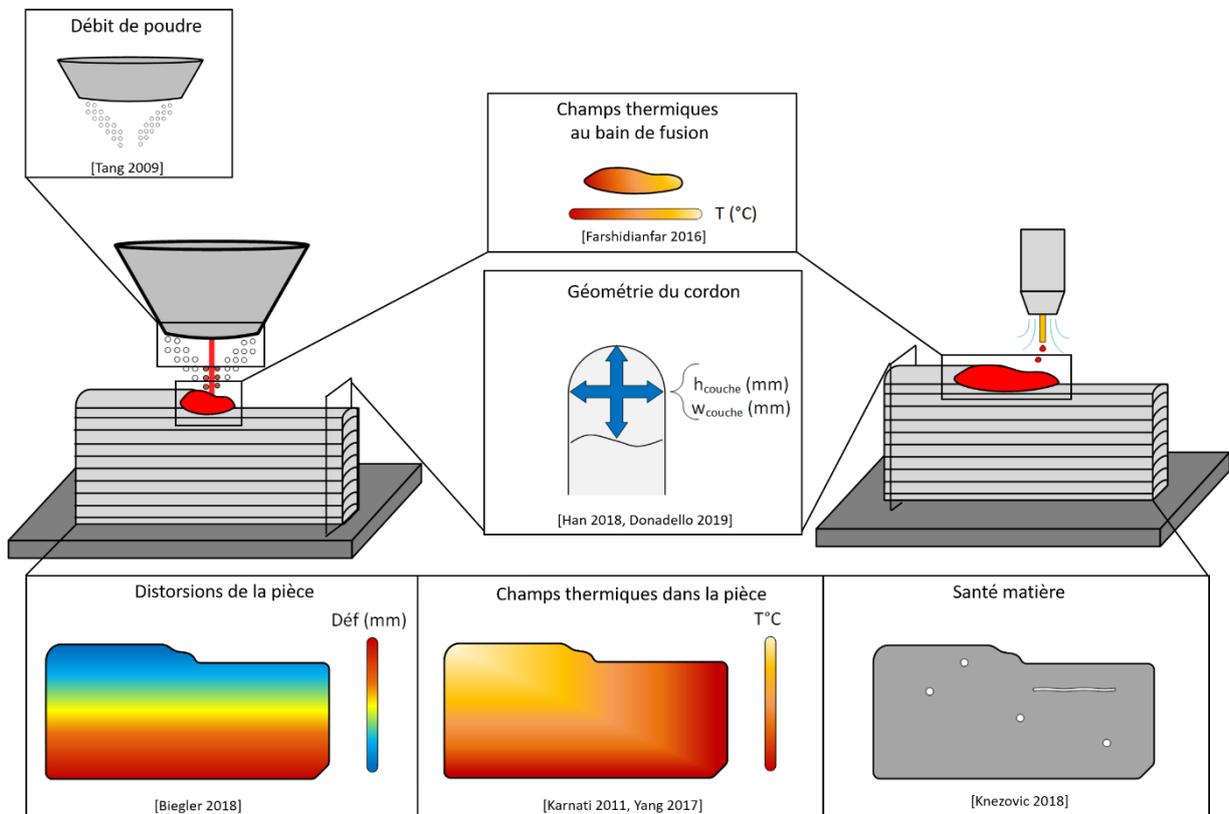


Figure 1-7 : principaux phénomènes, paramètres opératoires et caractéristiques de la pièce contrôlés en cours de fabrication DED.

Les différents moyens expérimentaux associés aux principaux types de *monitoring* présentés seront détaillés dans les chapitres correspondants. A ce stade, il convient de discuter de la maturité globale de ces différents types de *monitoring* :

- ***monitoring* thermique** : du fait du rôle important joué par les phénomènes thermiques en cours de fabrication, le contrôle thermique constitue un axe de recherche majeur. De nombreuses boucles de contrôle de la puissance de la source de chaleur sont proposées pour maîtriser les évolutions thermiques de la pièce [Farshidianfar 2016, Wu 2017, Yang 2017]. Cependant, du fait des moyens optiques employés et de la difficulté de calibrer ces derniers, l'obtention de mesures thermiques fiables n'est pas triviale et constitue la difficulté principale associée à ce type de contrôle [Karnati 2013] ;
- ***monitoring* géométrique** : la qualité dimensionnelle de la pièce étant un des objectifs principaux en FA, le contrôle de la géométrie constitue un deuxième axe de recherche majeur. Des stratégies prometteuses, principalement basées sur une correction de la vitesse d'avance pour ajuster la quantité de matière déposée, sont proposées [Han 2018] ;
- ***monitoring* débit matière** : la piste de *monitoring* du débit de matière dans le cas du LMD, bien que pertinente, est rarement développée à cause de sa difficulté de mise en œuvre, tant au niveau de la prise de mesure que de la correction [Tang 2011] ;
- ***monitoring* santé matière et distorsions** : à notre connaissance, aucune boucle de contrôle complète dédiée à ces aspects n'a été proposée dans la littérature. Les investigations portent actuellement sur la proposition d'une instrumentation du procédé permettant l'obtention de données exploitables [Biegler 2018, Knezović 2018].

La pertinence des boucles de *monitoring* proposées dans la littérature pour améliorer la qualité des pièces et la fiabilité des procédés DED a été prouvé sur de nombreux cas [Heralic 2012, Xiong 2014, Gibson 2019]. Cependant, les performances des solutions de *monitoring* actuelles sont limitées. En effet, la grande majorité des boucles de contrôle proposées dans la littérature se focalisent sur un unique phénomène de la fabrication – thermique ou géométrie par exemple – à travers la considération d'une ou plusieurs grandeur(s) physique(s). Cependant, comme évoqué dans la Section II.3., les procédés DED sont complexes, avec de nombreux phénomènes non-linéaires et interdépendants [Quaranta 2020]. Ainsi, la modification des paramètres opératoires, dans le but de maîtriser une grandeur physique associée à un phénomène particulier, a nécessairement des répercussions sur les autres phénomènes de la fabrication [Salehi 2006]. Or, la plupart des stratégies de *monitoring* proposées par la littérature ne permettent a priori pas d'appréhender les effets globaux des corrections [Salehi 2006, Purtonen 2014]. C'est pourquoi la mise en œuvre d'une unique stratégie de *monitoring* monophysique paraît limitée pour assurer le bon déroulement de la fabrication et garantir la qualité de la pièce finale sur une large gamme de cas d'application [Purtonen 2014].

Afin de permettre un contrôle robuste du procédé, il apparaît donc nécessaire de proposer des stratégies de *monitoring* multiphysique. Des concepts de *monitoring* multiphysique commencent à être proposés dans la littérature, comme celui de Xu *et al.* dédié au procédé WAAM. Comme illustré en Figure 1-8, Xu *et al.* proposent de contrôler simultanément les phénomènes thermiques, la géométrie et la protection gazeuse du procédé [Xu 2016]. Cependant, à notre connaissance, aucune application concrète de *monitoring* multiphysique n'a été publiée actuellement. En effet, l'interdépendance des phénomènes régissant la fabrication constitue également la principale difficulté de développement et de mise en œuvre de ce type de *monitoring*.

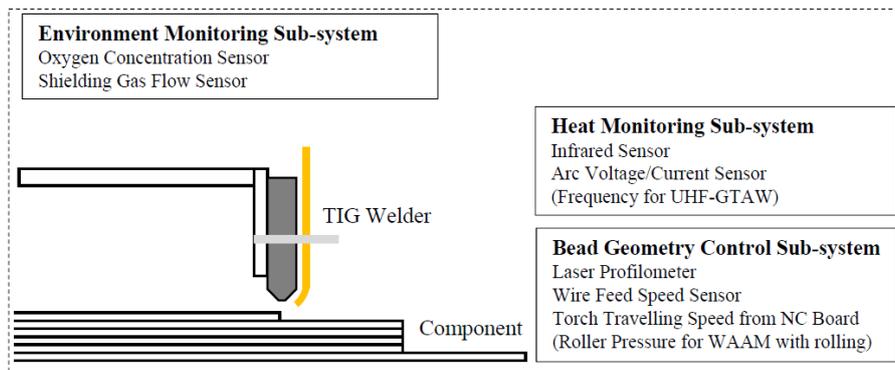


Figure 1-8 : concept de stratégie de monitoring multiphysiques proposée par Xu *et al.* [Xu 2016].

#### 4.2. Etat de l'art de la simulation multiphysique appliquée aux procédés DED

Le développement d'outils numériques capables de simuler l'évolution du procédé pour la fabrication d'une pièce donnée constitue un deuxième axe d'amélioration de la maîtrise des procédés DED. Pour ce faire, il est nécessaire de se doter de modèles multiphysiques qui puissent rendre compte le plus fidèlement possible des phénomènes pertinents de la fabrication dans des temps de calculs raisonnables.

La Figure 1-9 illustre les différentes échelles de simulation des procédés de Fabrication Additive DED actuellement proposées dans la littérature :

- l'échelle **microscopique**, considérant un volume élémentaire de matériau déposé. Les études menées à cette échelle sont focalisées sur la microstructure et peuvent notamment s'effectuer avec des méthodes des Eléments Finis (EF) [Zhou 2017, Lindgren 2016] ;
- l'échelle **mésoscopique** focalisée sur le bain de fusion. A cette échelle, on distingue deux phénomènes à étudier : le comportement fluide du bain de fusion [Medina 2012, Khanafer 2019] et l'apport de matière, sous forme de poudre en LMD [Medina 2012] ou fil en WAAM [Cadiou 2020]. Les simulations correspondantes sont majoritairement menées avec des méthodes numériques issues de la mécanique des fluides (CFD) ;

- l'échelle **macroscopique** orientée sur le comportement thermomécanique de la pièce globale. Pour ce type de simulation, des méthodes classiques de mécanique numérique peuvent être utilisées [François 2018], comme la méthode EF [Ding 2011, Michaleris 2014, Biegler 2018, Montevocchi 2018, Hejripour 2019].

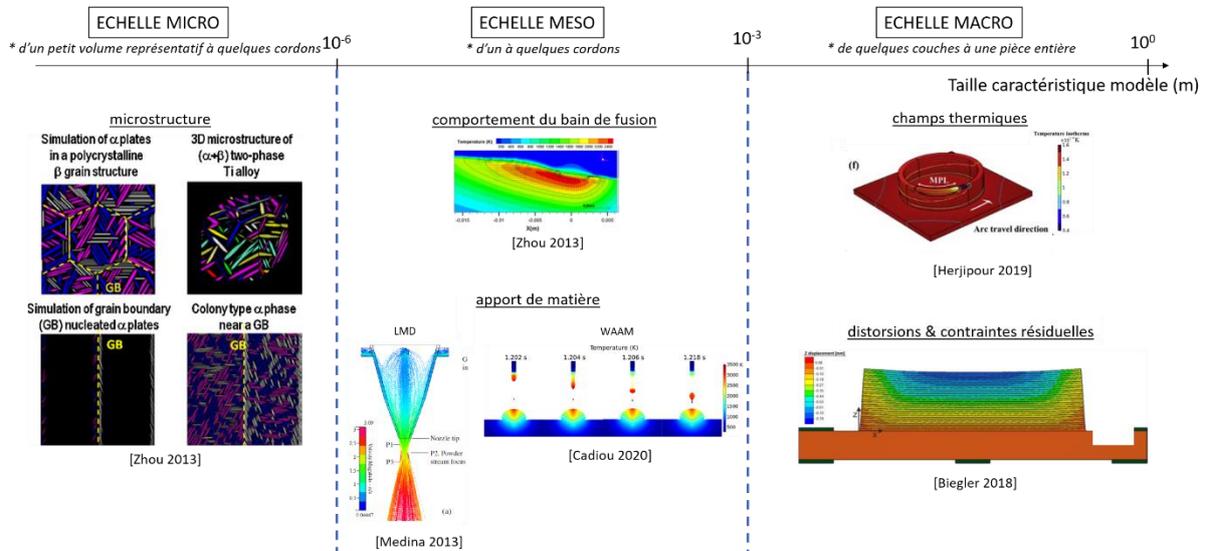


Figure 1-9 : illustration des différentes approches de simulation numérique en fonction des tailles caractéristiques.

Concernant l'application des logiciels de simulation thermomécanique EF classiques aux procédés DED, des limitations ont été mises en évidence dans la littérature [Michaleris 2014, Hejripour 2019]. D'une part, une résolution thermomécanique complète à chaque couche rend le temps de calcul total élevé, souvent incompatible avec une mise en œuvre sur un composant industriel. D'autre part, le manque de fonctions de mise en données compatibles avec le nombre de couches mis en jeu est parfois un obstacle critique pour la modélisation des pièces, notamment pour des géométries complexes de grandes échelles. Face aux limitations identifiées, de nouveaux outils de simulation EF dédiés aux procédés DED apparaissent. Ces derniers mettent en œuvre des fonctions de mise en données adaptées au caractère additif des procédés, notamment l'import automatique des trajectoires à partir d'un logiciel de *Computer Assisted Manufacturing* [François 2017, Li 2019]. Par ailleurs, pour pallier les limitations de temps de calcul, des méthodes de maillage adaptatif et des stratégies numériques simplifiées sont proposées [Li 2019].

Quel que soit le logiciel et la méthode numérique considérés, l'identification des paramètres du modèle – notamment les conditions aux limites et la paramétrisation de la source de chaleur équivalente – reste non triviale. En effet, les procédés DED mettent en jeu de larges gammes de températures donnant lieu à des changements de phase et des phénomènes de pertes de chaleur complexes. La mise en œuvre d'un modèle numérique fiable passe également par la caractérisation du comportement du matériau mis en œuvre en Fabrication Additive, souvent difficilement identifiable expérimentalement [Aucott 2018].

## 5. Bilan de l'état de l'art

La Fabrication Additive apporte de nouvelles possibilités de fabrication et de liberté de conception des pièces fonctionnelles métalliques. Parmi les procédés de Fabrication Additive métallique existants, les procédés DED sont des procédés prometteurs pour réaliser des pièces industrielles de grandes échelles [Moussion 2017, Queguineur 2018]. Cependant, les procédés DED sont complexes, multiphysiques et multiéchelles, avec des couplages entre les différents phénomènes impliqués. A travers l'analyse de l'état de l'art, nous avons identifié les éléments constitutifs et distinctifs des procédés DED. Une représentation de ces derniers est proposée en Figure 1-10. Nous identifions trois éléments représentatifs des procédés DED :

- les **paramètres opératoires du procédé**, gouvernant les conditions de dépôt, notamment la protection du bain de fusion, le cône de poudre ou le comportement de l'arc électrique suivant la technologie ;
- les **phénomènes thermomécaniques** régissant la fabrication et le **comportement du matériau** associé. Dans le cas de la thermique, nous pouvons distinguer deux échelles mises en jeu : d'une part à l'échelle locale, avec l'apport de chaleur au niveau du bain de fusion et à l'échelle globale, avec les champs thermiques issus de la dispersion de l'apport de chaleur dans les cordons déposés. Ces deux échelles de phénomènes thermiques vont générer des contraintes résiduelles au sein de la pièce ;
- les **caractéristiques de la pièce**, principalement la géométrie de ses cordons ainsi que sa microstructure.

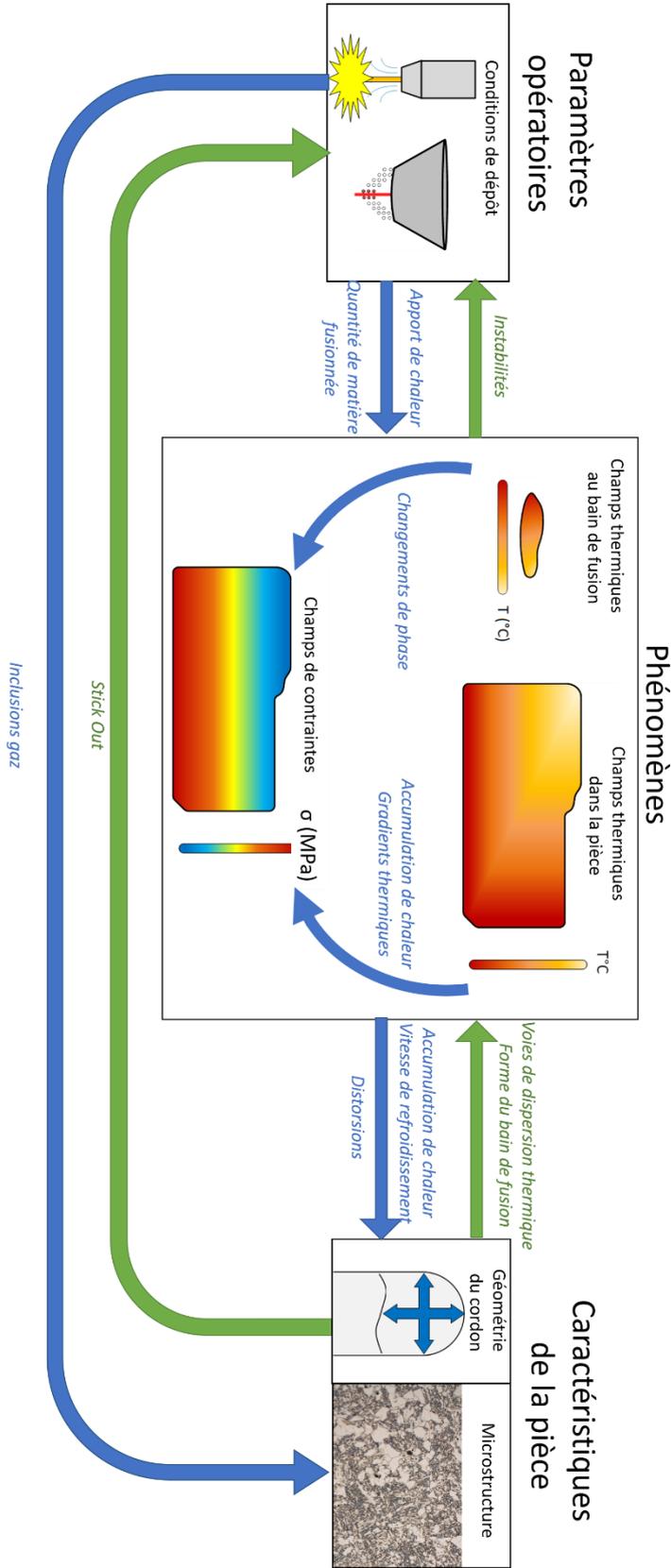


Figure 1-10 : représentation des éléments constitutifs de la fabrication DED.

Les différents aspects identifiés en Figure 1-10 interagissent entre eux. Tout d'abord, les conditions de dépôt régissent la quantité de matière fusionnée ainsi que les caractéristiques de l'apport de chaleur – taille, puissance –, qui impactent directement le comportement des phénomènes thermomécaniques se développant en cours de fabrication. En retour, les phénomènes thermomécaniques peuvent générer des instabilités des conditions de dépôt, principalement à travers le comportement du bain de fusion. Par ailleurs, la géométrie de la pièce est gouvernée par la quantité de matière fusionnée ainsi que par le comportement mécanique du matériau au niveau du bain de fusion. A l'échelle de la pièce, les distorsions résultant de l'équilibre des champs de contrainte vont avoir des répercussions directes sur la géométrie globale. De plus, l'élévation de température des cordons déposés, liée à une dispersion lente de l'apport de chaleur, peut provoquer l'affaissement de la pièce. En retour, la géométrie des cordons va contraindre le comportement et la forme du bain de fusion et les voies de dispersion thermique, impactant indirectement les phénomènes mécaniques et modifier indirectement les conditions de dépôt à travers le *Stick Out*.

De par la complexité du fonctionnement des procédés DED, il est souhaitable de maintenir des paramètres opératoires les plus constants possibles en cours de fabrication afin de garantir des conditions de dépôt et des caractéristiques des cordons identiques. Cependant, les évolutions des phénomènes thermiques en cours de fabrication peuvent nécessiter l'ajustement des paramètres opératoires pour rester dans la plage de fonctionnement du procédé. Cependant, les procédés DED étant majoritairement mis en œuvre en boucle ouverte, il est souvent difficile de maîtriser l'ajustement de ces paramètres. Ainsi, la fabrication d'une pièce conforme est souvent le fruit d'une méthode d'essai-erreur.

Face aux problématiques de mise en œuvre mentionnées précédemment, des moyens de simulation numérique et de *monitoring* sont proposés dans la littérature afin de maîtriser le fonctionnement des procédés DED. Quelle que soit la méthode retenue – numérique ou expérimentale – l'enjeu principal est de recueillir des données informant du caractère multiphysique des procédés pour mettre en place des actions correctives pertinentes en cours de fabrication. Concernant la simulation numérique, le principal verrou scientifique identifié concerne le développement d'un modèle numérique capable de rendre compte quantitativement du comportement thermomécanique global de la pièce, couche après couche et ce dans des temps de calculs compatibles avec les exigences industrielles. Concernant le *monitoring*, il s'agit de proposer de nouvelles stratégies de contrôle qui puissent considérer les différentes physiques régissant les procédés.

## II. Positionnement de l'étude

### 1. Objectifs et périmètre à l'échelle du laboratoire

Le contrôle en temps réel et la simulation numérique des procédés de fabrication constituent deux des axes de recherche suivis au laboratoire [Rauch 2009 & 2014, Muller 2012 & 2013, Poulhaon 2014]. Ces deux approches sont considérées comme complémentaires pour maîtriser les procédés, car l'une permet de prédire le comportement thermomécanique des pièces fabriquées et l'autre permet de détecter et corriger les aléas en cours de fabrication [Poulhaon 2014].

#### 1.1 *Intégration des outils de maîtrise dans un environnement de fabrication DED*

Dans le cas de la Fabrication Additive DED, l'intégration des moyens de simulation numérique et de *monitoring* dans un environnement de fabrication générique est présentée en Figure 7-1, suivant la norme *Structured Analysis and Design Technics* (SADT).

En niveau A0 de la Figure 7-1, la fonction principale d'un procédé DED est de produire une pièce à partir d'une maquette numérique de la pièce souhaitée et d'un matériau d'apport. La pièce fabriquée doit être conforme à un certain cahier des charges renseigné en amont de la fabrication. Le procédé mis en œuvre est représenté par une commande numérique qui régit un système de déplacement, un système d'apport de matière, une source de chaleur associés. Afin de réaliser la pièce, les différentes étapes de la chaîne de fabrication correspondante sont listées dans le Niveau A1, depuis la détermination de la plage de fonctionnement du procédé et la traduction du cahier des charges en règles de fabrication jusqu'à la qualification de la pièce fabriquée. Enfin, les différentes étapes menées en cours de fabrication font l'objet du Niveau A2 de la Figure 7-1.

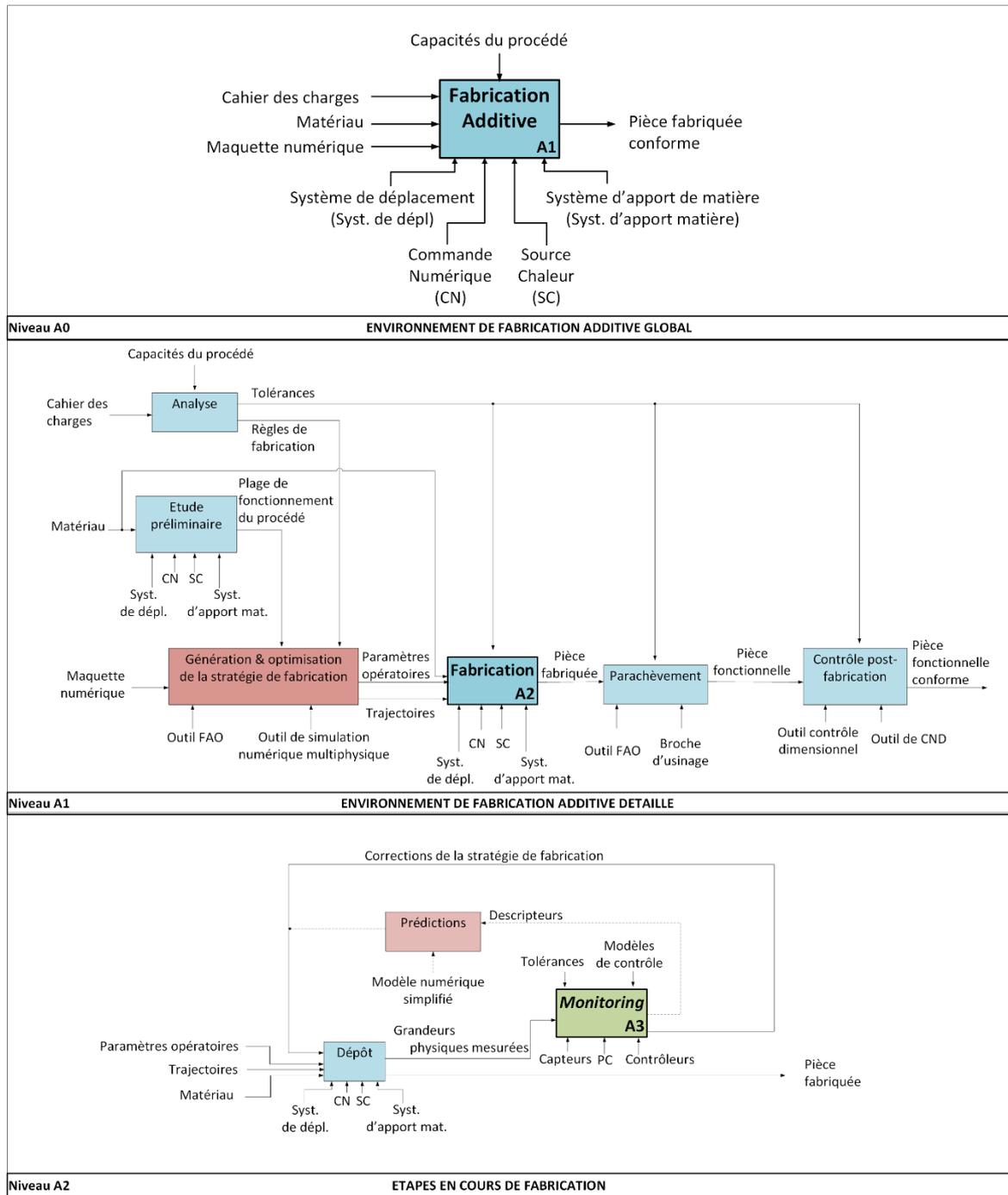


Figure 1-11 : intégration des outils de maîtrise dans un environnement de fabrication additive.

Comme illustré en rouge pour la simulation numérique et en vert pour le *monitoring* en Figure 7-1, l'intégration de ces outils dans le processus de Fabrication Additive peut s'effectuer en amont ou en cours de fabrication, respectivement décrits en niveau A1 et A2. Notamment :

- lors de l'élaboration de la stratégie de fabrication, le recours à un modèle multiphysique pour anticiper les évolutions thermomécaniques de la pièce en cours de fabrication aiderait à l'optimisation des paramètres opératoires [Montevocchi 2018, Quaranta 2020].
- la mise en œuvre des moyens de *monitoring* en cours de fabrication permettrait la détection en temps réel des déviations du comportement de la fabrication, au moyen de la considération de grandeurs physiques informant sur l'état du procédé ou de la pièce. Dans le cas d'une dérive détectée, une correction est apportée à la stratégie de fabrication de manière à garantir une pièce finale conforme aux exigences du cahier des charges [Muller 2013].
- lorsque les moyens numériques le permettront, il est également choisi de mettre en œuvre la simulation numérique conjointement au *monitoring* en cours de fabrication : en ce sens, des descripteurs extraits des données mesurées via *monitoring* pourraient alimenter des modèles numériques simplifiés afin de prédire les caractéristiques de la pièce et d'apporter des pistes supplémentaires pour corriger la fabrication. Cette implémentation de la simulation numérique en cours de fabrication permettrait de réduire le nombre de capteurs et de prédire l'évolution d'une caractéristique non mesurée à partir d'une donnée mesurée corrélée avec cette dernière, comme développé en usinage [Poulhaon 2014].

## 1.2 Procédés DED mis en œuvre

Les outils de maîtrise identifiés précédemment sont appliqués aux procédés LMD et WAAM mis en œuvre au laboratoire. Les équipements relatifs aux deux procédés vont être successivement présentés.

Tout d'abord, le procédé LMD est mis en œuvre avec une machine CLAD® illustrée en Figure 1-12.a. Le système de fabrication est basé sur une machine-outil cinq axes. L'apport d'énergie est réalisé avec un laser fibre Nd:YAG de 2 kW de puissance nominale. Deux systèmes de distribution de poudre apportent un ou plusieurs types de poudres vers une tête de dépôt coaxiale avec le faisceau laser. Le laboratoire met également en œuvre une cellule robotisée multiprocédé illustrée en Figure 1-12.b. Cette cellule robotisée est organisée autour d'un robot porteur KUKA KR500MT comportant six axes. Son rayon d'action est de 2830 mm et sa charge maximale admissible est de 500 kg. La cellule robotisée est équipée pour réaliser une fabrication hybride avec des procédés additifs, via une torche de soudage GMAW et deux têtes LMD et des procédés soustractifs, via une broche d'usinage grande vitesse. Dans ces travaux, le procédé WAAM a été mis en œuvre avec le mode *Cold Metal Transfer* (CMT), qui est une amélioration du procédé GMAW [Selvi 2018].

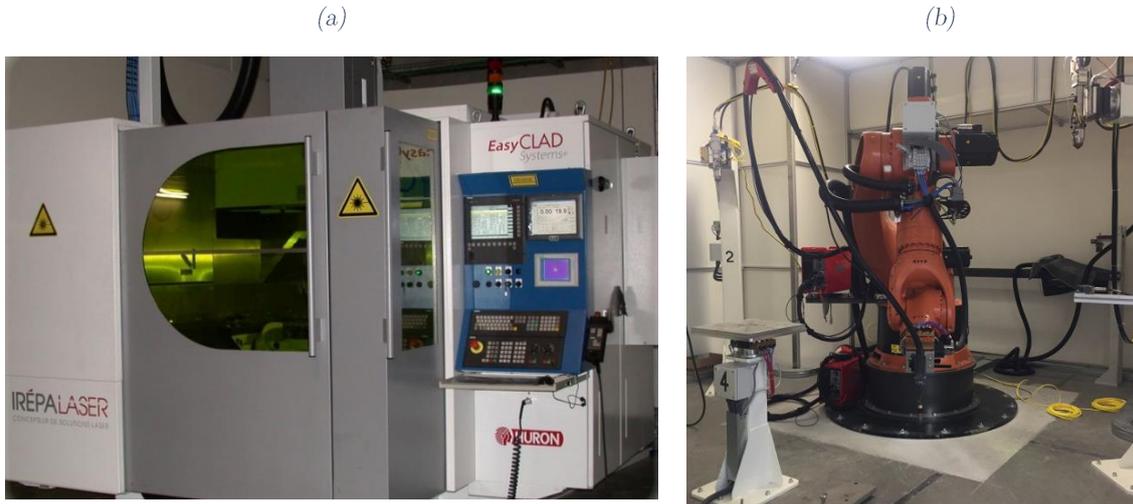


Figure 1-12 : (a) machine CLAD<sup>®</sup> mise en œuvre pour le procédé LMD, (b) cellule robotisée multiprocédé mise en œuvre pour le procédé WAAM.

Au-delà de leurs développements menés sur les moyens à disposition, les méthodes numériques et expérimentales développées au sein du laboratoire sont voulues génériques et applicables à un large panel de procédés, matériaux et géométries de pièces.

## 2. Définition du périmètre de l'étude

Le *monitoring* présente un intérêt pour améliorer les performances des procédés, quel que soit le degré de maturité des modèles numériques associés. En effet, le *monitoring* peut être mis en œuvre pour :

- maîtriser la fabrication dans le cas où aucun modèle numérique fiable n'est disponible ;
- ajuster les modèles numériques avec les données expérimentales recueillies ;
- détecter en temps réel les aléas par rapport à une évolution souhaitée de la fabrication, lorsque les outils numériques et expérimentaux permettent une utilisation conjointe de la simulation et du *monitoring*.

De manière complémentaire, la simulation numérique peut apporter des éléments de compréhension des phénomènes régissant le procédé et simplifier la mise en œuvre du *monitoring*. En particulier, la mise en œuvre d'un modèle numérique fiable et rapide permettrait :

- d'aider à la détermination des paramètres opératoires en amont de la fabrication et ainsi de limiter les itérations de mise au point du procédé sur un nouveau cas d'application ;
- d'optimiser la position des capteurs pour mieux capturer les phénomènes pertinents ;
- d'accéder à des quantités d'intérêt difficilement accessibles expérimentalement ;
- d'anticiper les effets des actions correctives préconisées et d'aider à la définition des bornes de contrôle des différentes stratégies de *monitoring* employées.

Ces travaux vont principalement se focaliser sur le *monitoring*. En particulier, le cadre de ces recherches sera orienté sur la mesure en temps réel et les corrections à apporter aux paramètres opératoires en cours de fabrication pour compenser les éventuels défauts détectés. Nous ferons l'hypothèse que les plages de fonctionnement des procédés concernés seront connues et que les paramètres opératoires optimaux auront été déterminés en amont de la fabrication. Par ailleurs, afin d'identifier les perspectives de dialogue entre les deux approches évoquées précédemment, la simulation numérique sera abordée parallèlement aux développements de *monitoring*. Dans cette investigation, nous nous placerons principalement comme utilisateur final des logiciels existants et évaluerons les perspectives d'utilisation de ces derniers dans le cadre de nos travaux.

La Figure 1-13 constitue le détail de la fonction « *Monitoring* » de l'environnement de fabrication général du laboratoire présenté en Figure 7-1. Nous souhaitons proposer une méthodologie de *monitoring* multiphysique, dont les différents axes de contrôle à développer sont détaillés dans le niveau A3 de la Figure 1-13. A partir de l'analyse de l'état de l'art effectué en Section I.5, nous identifions la nécessité de contrôler :

- les **phénomènes thermiques**, de par leurs impacts sur l'ensemble de la fabrication ;
- les implications en termes de **géométrie** et de **santé matière** de la pièce ;
- les **conditions de dépôt**.

La mise en œuvre générale des boucles de contrôle du niveau A3 est détaillée dans le niveau A4 de la Figure 1-13. En première approche, ces boucles de contrôle sont considérées avec une entrée et une sortie. En particulier, l'acquisition d'une grandeur physique corrélée avec la caractéristique d'intérêt est réalisée au moyen d'un capteur dédié et intégré dans l'environnement de fabrication. Cette acquisition peut s'effectuer en temps réel tout au long de la fabrication, ou lors de phases dédiées au contrôle en cours de fabrication, par exemple entre les phases de dépôt. Les données expérimentales doivent être traitées en temps réel afin d'en extraire un descripteur exploitable à des fins de contrôle. Le descripteur est comparé à une valeur seuil, définie en fonction du cahier des charges, pour analyser l'état de la fabrication. A travers la considération d'un modèle de contrôle reliant le descripteur au paramètre opératoire choisi pour corriger la fabrication, l'écart résultant va permettre de définir une nouvelle consigne à apporter à la stratégie de fabrication.

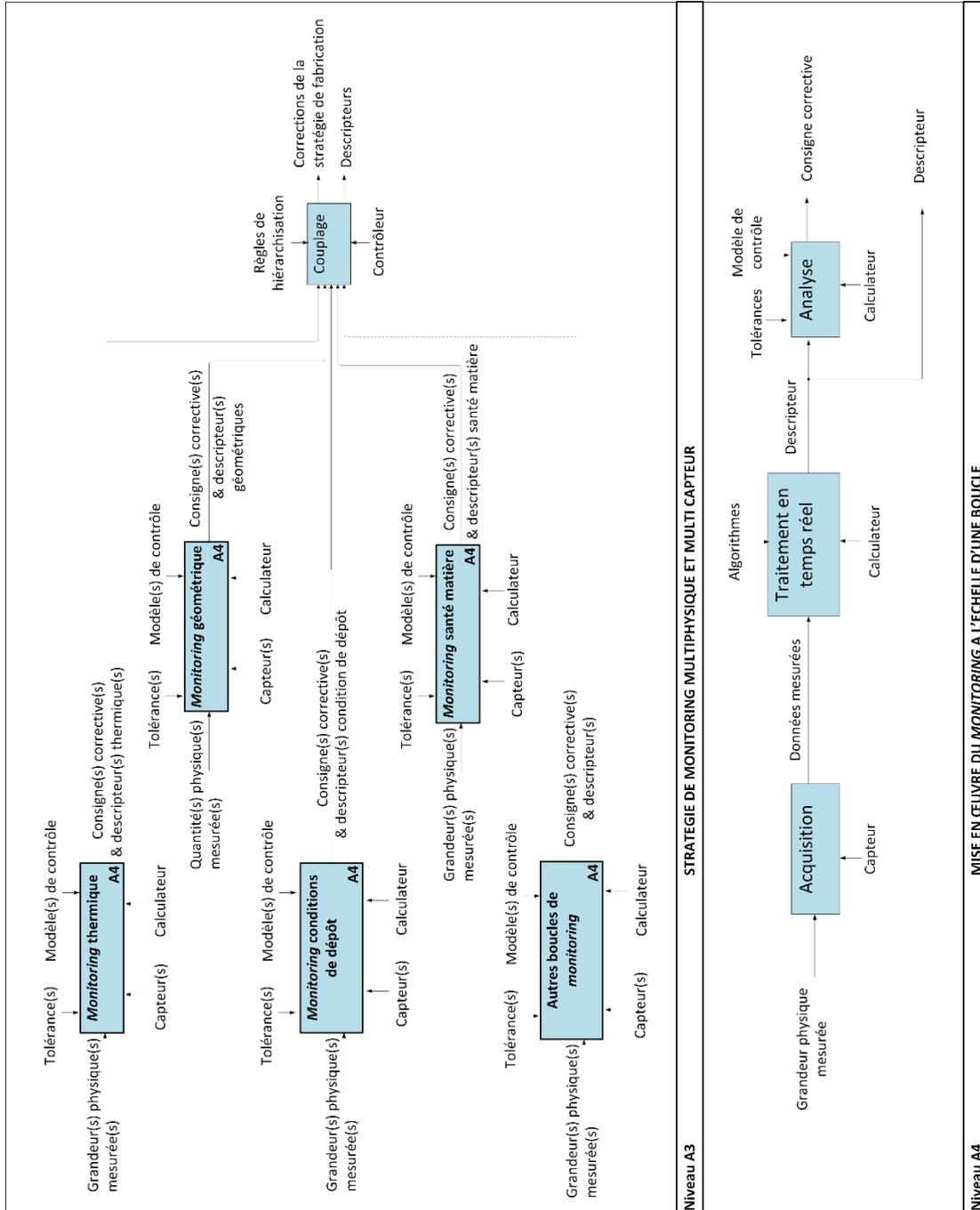


Figure 1-13 : approche de monitoring multiphysique proposée dans ces travaux.

### 3. Objectifs de la thèse

A partir du périmètre défini précédemment, les objectifs de thèse sont les suivants :

- proposer une méthodologie de *monitoring* multiphysique qui permette d'étudier les interactions entre les éléments constitutifs des procédés DED identifiés ;
- mettre en place cette méthodologie de *monitoring* avec des moyens de mesure simples, fiables et compatibles avec des environnements de travail industriels ;
- pour chaque axe de contrôle, identifier la grandeur physique d'intérêt et les descripteurs associés discriminants.

Ces objectifs permettront d'apporter des éléments de compréhension des procédés vers leur amélioration et leur optimisation.

## III. Méthodologie de recherche et plan de la thèse

### 1. Méthodologie de recherche

Face au caractère multiphysique des procédés DED, ces travaux proposent d'adopter une approche de développement découplée : dans un premier temps, chaque axe identifié dans la Figure 1-13 va être étudié séparément et faire l'objet du développement d'une boucle de contrôle dédiée. Pour chaque boucle, les choix en termes de prise de mesure, de grandeur physique à mesurer et de paramètre opératoire à corriger sont menés de façon à permettre une mise en œuvre simultanée dans une stratégie de *monitoring* multiphysique globale. Le développement des boucles de contrôle a suivi une même approche expérimentale, schématisée en Figure 1-14 et décrit ci-après.

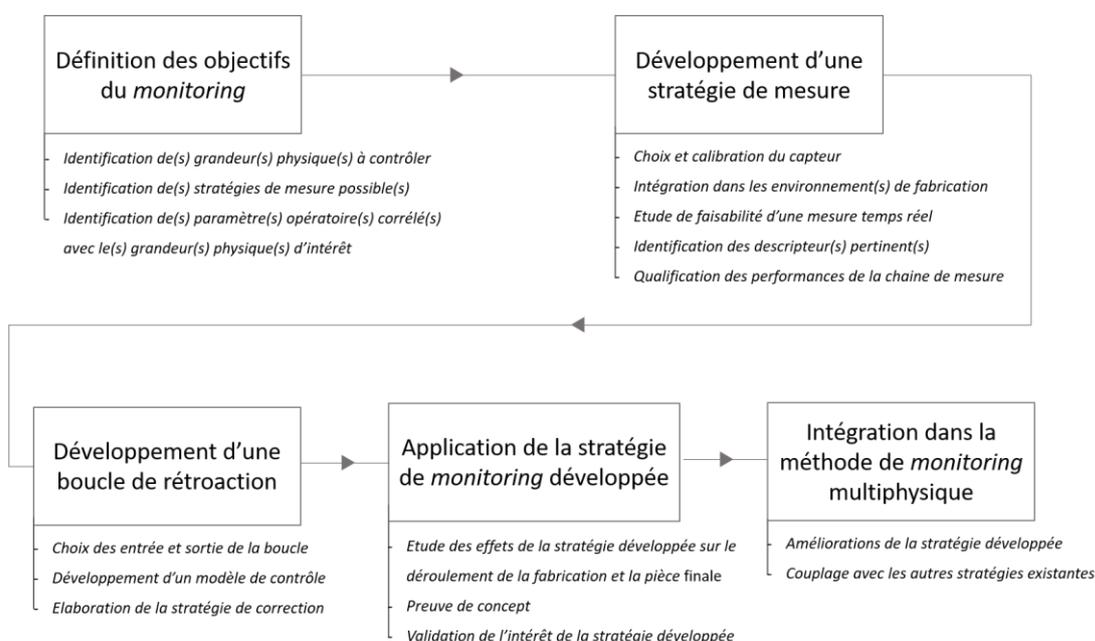


Figure 1-14 : méthodologie de développement des boucles de monitoring.

Tout d'abord, une étude préliminaire est menée pour définir les objectifs du type de *monitoring* considéré. En particulier, il est nécessaire de déterminer l'échelle d'application du *monitoring* – échelle du bain de fusion, de la couche ou de la pièce globale – et de définir les grandeurs physiques à contrôler. Cette définition des objectifs de contrôle permet d'identifier les méthodes de mesure adaptées à travers des recherches bibliographiques ou une étude comparative des capteurs existants. Des paramètres opératoires corrélés avec la grandeur physique d'intérêt et potentiellement compatibles à des fins de contrôle peuvent d'ores-et-déjà être identifiés au regard du savoir-faire du laboratoire ou des recherches bibliographiques.

A l'issue de la définition des objectifs du *monitoring*, les premiers développements portent sur la méthode de mesure. Dans un premier temps, un capteur est choisi pour l'application et intégré dans les environnements de fabrication concernés – ici LMD et WAAM, comme présenté en Section III.3. Au travers de premiers essais sur des cas simples, la faisabilité de la mesure en cours de fabrication, que ce soit pendant ou entre les phases de dépôt, est étudiée. Cette étude permet d'ores-et-déjà d'identifier les possibilités de mise en œuvre de la stratégie de *monitoring*, en temps réel ou lors de phases de contrôle à définir dans le processus de fabrication. Une fois la faisabilité de la mesure validée, les données expérimentales fournies par la chaîne de mesure sont explorées à la recherche de descripteurs corrélés avec le phénomène ou la caractéristique à contrôler. Ce travail peut être mené à partir de nouveaux essais, où différentes stratégies de fabrication sont choisies afin de donner lieu à des pièces correctes et incorrectes du point de vue de la grandeur physique étudiée. Parallèlement à ces investigations, il est nécessaire de calibrer le capteur et de qualifier les performances de la méthode de mesure développée – résolution, précision, justesse, répétabilité – pour assurer la fiabilité des mesures. Si possible, ces étapes de calibration et qualification sont menées dans l'environnement de fabrication, ou dans des conditions s'en rapprochant.

Une stratégie de *monitoring* est élaborée à partir de la méthode de mesure développée. En ce sens, un couple {descripteur, paramètre opératoire} est sélectionné parmi ceux identifiés pour constituer l'entrée et la sortie de la boucle de contrôle. Il est nécessaire de déterminer le lien entre le descripteur et le paramètre opératoire retenus afin de construire le modèle de contrôle. Cette détermination peut être menée à travers une série de fabrications de géométries simples balayant la gamme admissible du paramètre opératoire d'intérêt. Le modèle de contrôle résultant va permettre de prédire l'évolution de la grandeur physique provoquée par la variation du paramètre opératoire associé et va servir de base à la stratégie de correction à mener.

Une fois le développement complet, une preuve de concept de la stratégie de *monitoring* est réalisée. A travers un cas d'étude, les effets de la stratégie de *monitoring* sont mis en évidence par rapport à une fabrication en boucle ouverte. Les effets investigués peuvent notamment concerner le déroulement de la fabrication, le temps de fabrication global et les caractéristiques de la pièce finale – dimensions, microstructure. Les conclusions obtenues dans le cas d'étude permettent de valider la pertinence et l'intérêt de la stratégie de *monitoring* développée.

La dernière étape de la démarche de recherche consiste à intégrer la boucle de contrôle développée dans la méthode de *monitoring* multiphysique globale. La mise en parallèle avec les éventuelles stratégies de *monitoring* déjà développées constitue le principal défi de cette intégration afin de limiter les perturbations de l'ajout de cette nouvelle boucle sur celles existantes.

Dans l'optique de développer et valider les différentes boucles de contrôle constituant la stratégie de *monitoring* multiphysique portée par ces travaux, une démarche expérimentale a été mise en œuvre. Notamment, les boucles de contrôle développées ont été testées et validées sur des équipements de Fabrication Additive LMD et WAAM présentes à l'Ecole Centrale de Nantes.

## 2. Plan de la thèse

Du fait de la prédominance des phénomènes thermiques sur le fonctionnement des procédés, il nous semble fondamental de maîtriser la thermique en premier lieu. Le développement d'un ***monitoring* thermique** sera donc l'objectif principal du **Chapitre 2**. En ce sens, il sera nécessaire d'étudier les différentes échelles des phénomènes thermiques mis en jeu et de faire un choix sur la/les échelle(s) à considérer dans cet axe de contrôle.

Face aux fortes interactions identifiées entre les phénomènes thermiques et mécaniques en cours de fabrication, nous souhaitons pouvoir appréhender les implications thermiques sur la géométrie de la pièce afin de garantir le respect des dimensions finales souhaitées. Ainsi, le **Chapitre 3** présentera le développement d'une boucle de **contrôle géométrique** compatible avec la boucle de contrôle thermique précédemment proposée dans l'optique d'une mise en parallèle. La **stratégie de *monitoring* thermo-géométrique résultante** sera détaillée et étudiée sur un cas d'application en fin de chapitre.

Le **Chapitre 4** abordera le **contrôle du *Stick Out*** afin de préserver des conditions de dépôt constantes. Pour ce faire, les investigations vont se porter sur le potentiel de *monitoring* à travers des **moyens acoustiques**. En effet, dans le cas des procédés par arc

électrique, les instabilités de l'arc se traduisent par des sons en cours de dépôt. Les variations de SO pouvant donner lieu à de telles instabilités, nous pensons que le **spectre sonore** contient des informations reliées au SO pouvant être utilisées à des fins de contrôle en temps réel. Ces investigations vont permettre de proposer une **méthode de mesure** fiable, simple et non-invasive du SO qui peut servir de base à l'élaboration d'une stratégie de *monitoring*.

Le **Chapitre 5** abordera l'axe de **contrôle de la santé matière** par des moyens de **Contrôle Non Destructif ultrasonores**. Une **méthode de mesure** sera principalement développée et son **intégration dans une stratégie de *monitoring*** sera évoquée en fin de chapitre.

Finalement, le **Chapitre 6** explorera la **piste numérique** comme support de la méthodologie de *monitoring* proposée. En ce sens, l'évaluation de certaines solutions numériques nous permettra d'identifier le niveau de maturité de la simulation Eléments Finis appliquée aux procédés DED et d'étudier son potentiel d'intégration dans le cadre de nos travaux.

En conclusion de ce manuscrit, une synthèse des travaux sera tout d'abord menée. Nous montrerons notamment la **com1 mmlémentarité** des boucles développées et la pertinence de l'**approche de *monitoring* multiphysique globale**. Au-delà de l'aspect *monitoring*, ces travaux nous permettront de proposer une **hiérarchisation** des différents phénomènes étudiés et d'apporter des éléments de compréhension sur le fonctionnement des procédés.



---

## Chapitre 2 : Développements d'une stratégie de *monitoring* thermique

### I. Introduction

De par la nécessité de fusionner le matériau pour déposer les cordons, nous avons identifié les phénomènes thermiques comme prédominants dans le fonctionnement des procédés DED. Notamment, les phénomènes thermiques interviennent à deux échelles, locale au bain de fusion et globale dans la structure complète solidifiée. Comme évoqué dans le premier chapitre, ces deux échelles ont un impact direct sur les phénomènes mécaniques en cours de fabrication, la santé matière de la pièce et la géométrie des cordons déposés. Nous avons donc choisi de maîtriser ces phénomènes en premier parmi l'ensemble des axes de contrôle identifiés.

Ce chapitre présente les développements d'une boucle de contrôle thermique dédiée aux procédés DED. A l'issue de l'état de l'art présenté en Partie II, une discussion sur l'échelle des phénomènes à privilégier pour le contrôle thermique sera menée. Les impacts des phénomènes thermiques à l'échelle de la pièce sur l'échelle locale du bain de fusion étant identifiés comme majeurs, il est choisi d'orienter ces travaux sur une boucle de contrôle thermique global. La Partie III présente le développement d'une méthode de mesure des champs de température à l'échelle de la pièce à l'aide d'une caméra thermique. Dans la Partie IV, une attention particulière est portée sur le choix du descripteur thermique à considérer en entrée de la boucle de contrôle. Un cas d'application est présenté en fin de chapitre afin de montrer les apports de la boucle de contrôle thermique développée.

### II. Etat de l'art des stratégies de *monitoring* thermique dédiées aux procédés DED

Parmi les états de l'art sur le *monitoring* thermique des procédés de Fabrication Additive métallique, l'état de l'art détaillé par Yan *et al.* dresse un aperçu complet des diverses méthodes actuellement mises en œuvre [Yan 2018]. Le contrôle thermique de ces procédés est souvent effectué avec des capteurs optiques, tels qu'un pyromètre multi longueur d'ondes ou divers types de caméras, *Charged Coupled Device* (CCD), *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* (CMOS) ou Infrarouge (IR).

Actuellement, deux principales méthodes sont employées pour contrôler la température en cours de procédés DED :

- une méthode locale, focalisée sur les caractéristiques du bain de fusion .
- une méthode globale, considérant les champs thermiques à la surface de la pièce.

Pour ces deux méthodes, les paragraphes suivants vont détailler l'état de l'art des montages expérimentaux et des différentes grandeurs mesurées choisies pour effectuer un contrôle thermique en temps réel.

Le comportement du bain de fusion étant l'une des signatures les plus riches des procédés DED, la plupart des stratégies de *monitoring* thermique développées dans la littérature se focalisent sur ses caractéristiques [Hofman 2012, Smurov 2013, Farshidianfar 2016, Emanian 2017, Xiong 2019, Gibson 2019]. Concernant le procédé LMD, différentes instrumentations ont été proposées. Le montage expérimental le plus souvent choisi consiste à combiner une ou plusieurs caméras CCD ou CMOS dans l'enceinte de fabrication avec un pyromètre monté sur la tête de dépôt, afin respectivement de capturer les dimensions et de mesurer localement la température du bain de fusion [Song 2012, Smurov 2013, Farshidianfar 2016, Emamian 2017, Gibson 2019]. Ces caméras peuvent être également intégrées dans la tête de dépôt et prendre des images co-axiales du bain de fusion, à l'aide de plusieurs miroirs [Hofman 2012]. L'utilisation d'une caméra thermique infrarouge permet de regrouper les considérations géométriques et thermiques du bain de fusion à partir d'un seul flux d'acquisition – les images thermiques [Farshidianfar 2016]. Concernant le procédé WAAM, les perturbations causées par l'arc électrique et la protection gazeuse rendent difficile la mise en œuvre d'un contrôle thermique via le bain de fusion. A notre connaissance, l'étude très récente de Gibson *et al.* est la première à mettre en œuvre un *monitoring* thermique des caractéristiques du bain de fusion pour le procédé WAAM [Gibson 2019].

A partir des acquisitions *in-situ* du bain de fusion obtenues via les différents capteurs précédemment décrits, des corrections en temps réel des paramètres opératoires ont été proposées afin d'améliorer la stabilité de dépôt ou de contrôler la microstructure. Concernant le premier objectif, la boucle de rétroaction privilégiée consiste à ajuster la puissance laser en cours de fabrication afin de conserver une taille de bain de fusion constante en LMD [Hu 2003, Hofman 2012]. Cette méthode permet principalement de garantir des conditions identiques de dépôt et ainsi d'améliorer la précision géométrique des cordons déposés. Concernant le contrôle de la microstructure, Farshidianfar *et al.* ont montré la pertinence de modifier la vitesse d'avance en fonction des vitesses de solidification calculées au point le plus chaud du bain de fusion, afin de maîtriser la morphologie des grains et la composition du matériau déposé [Farshidianfar 2016].

A l'instar du bain de fusion, il est également pertinent de contrôler l'état thermique global de la pièce en cours de fabrication. En particulier, l'accumulation de chaleur au sein des cordons déjà déposés, provoquée par un apport de chaleur excessif ou une mauvaise gestion du refroidissement de la pièce, peut être fatal pour le déroulement du procédé et à la qualité de la pièce finale. Ce phénomène d'accumulation de chaleur, bien qu'étant présent pour tous les procédés DED, a particulièrement été étudié et contrôlé pour le procédé WAAM [Denlinger 2015, Wu 2017 & 2018, Yang 2017, Yan 2018]. Une caméra thermique infrarouge est le capteur privilégié pour ce type d'application, car permettant d'avoir une information surfacique de température [Yang 2017]. Avec cette instrumentation, Yang *et al.* ont conduit une analyse thermique détaillée de la fabrication de murs monocordons en acier faiblement allié. Ils ont notamment investigué l'effet de l'accumulation de chaleur sur des Zones à Hautes Températures, les gradients thermiques et les caractéristiques géométriques des cordons déposés [Yang 2017]. De son côté, Wu a proposé un montage expérimental avec un pyromètre monté sur la torche WAAM afin d'évaluer localement la température du dernier cordon déposé [Wu 2017]. Ses travaux ont montré que la considération de cette information locale de température pouvait être suffisante et donnait lieu à des perspectives de contrôle prometteuses. Concernant le LMD, les travaux de Haley *et al.* ont montré que l'accumulation de chaleur avait également un fort impact sur la stabilité de dépôt et la distance focale dans le cas du procédé LMD [Haley 2018]. Seuls les travaux menés par Karnati *et al.* ont été recensés dans le sens d'une application de la méthode de contrôle thermique global au LMD, via des considérations de Zones à Hautes Températures. Des difficultés de calibration du capteur thermique ont cependant limité les perspectives de contrôle [Karnati 2013].

La principale stratégie de contrôle proposée dans la littérature consiste à considérer la température d'interpasse ( $T_{\text{int}}$ ). La  $T_{\text{int}}$  est une donnée souvent considérée pour contrôler l'état thermique d'autres procédés conventionnels, tels que le soudage [Lundqvist 1977]. Le respect de cette température en phase de refroidissement permet, entre autres, de garantir une microstructure, une proportion de phases et des propriétés mécaniques souhaitées suivant le type de matériau mis en œuvre [Cunningham 2018]. Cette technique de contrôle de la température d'interpasse peut être étendue aux procédés DED et notamment au procédé WAAM. En ce sens, plusieurs études suggèrent d'ajuster la temporisation entre couches [Denlinger 2016, Geng 2016, Yang 2018, Cunningham 2018]. Des stratégies de contrôle de  $T_{\text{int}}$  par refroidissement forcé, avec utilisation de gaz cryogénique [Wu 2017] ou d'un système thermoélectrique [Li 2018], montrent également des améliorations de la microstructure, des propriétés mécaniques et de la stabilité géométrique des cordons. Les stratégies de contrôle de la température d'interpasse précédemment évoquées sont prometteuses, cependant, à notre connaissance, aucune boucle fermée, ni méthode de contrôle en temps réel n'ont été entièrement développées à partir de ces stratégies.

Des instrumentations alternatives pour le contrôle thermique des procédés peuvent être mentionnées, comme le design d'un capteur thermique optique haute vitesse et haute résolution pour le procédé *Electrom Beam Melting* [Boone 2017]. Des approches analytiques de modélisation des échanges thermiques peuvent être employées de manière complémentaire au contrôle *in-situ* [Papacharalampopoulos 2018].

Les précédents paragraphes viennent de détailler l'état de l'art concernant les deux principales stratégies de contrôle thermique employées pour les procédés DED, dont LMD et WAAM.

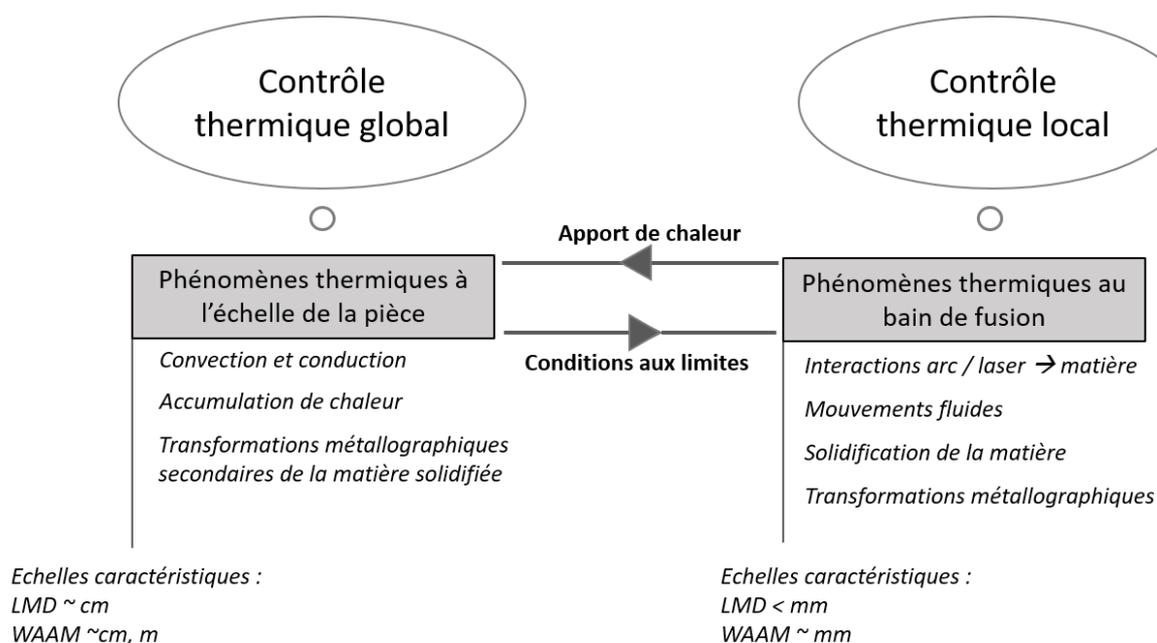


Figure 2-1 : schéma résumant les deux approches de monitoring thermique existantes pour les procédés DED.

En Figure 2-1, il convient de noter que les deux échelles thermiques impactent toutes les deux différents mécanismes de fabrication. Par exemple, le comportement thermique du bain de fusion va régir la solidification du matériau et engendrer une microstructure primaire. Cette microstructure primaire peut ensuite être sujette à de nouvelles modifications à travers les cycles de chauffe liés aux dépôts de couches successifs [Yu 2020]. Comme indiqué dans l'introduction, la compréhension et la maîtrise de l'impact de ces cycles thermiques sur la microstructure des couches déposées constitue un des verrous scientifiques actuels de la FA métallique [Everton 2016, Rodrigues 2019].

La Figure 2-1 met également en évidence des interactions entre les deux échelles locale et globale. En particulier, les champs thermiques au niveau du bain de fusion peuvent être perçus au sein du reste de la pièce comme un apport ponctuel de chaleur. A l'inverse, l'état thermique global de la pièce, régi par les modes de dissipation de la chaleur, a un impact non négligeable sur les physiques locales du procédé, en jouant le rôle de conditions aux limites thermiques pour le bain de fusion [Cunningham 2018]. Or, une

mesure thermique locale ne fournit pas d'information thermique au niveau des cordons déjà déposés. Cette technique de contrôle ne permet donc pas d'appréhender les effets de l'état thermique global de la pièce sur l'échelle locale.

Les techniques de contrôle local, privilégiées actuellement dans l'état de l'art, semblent alors insuffisantes pour produire un contrôle robuste des procédés pour une large gamme de cas d'application et de conditions de fabrication. Concernant l'approche globale, aucune étude n'a proposé de stratégie *de monitoring* global complète, c'est-à-dire de la prise de mesure jusqu'à la correction en temps réel du procédé, malgré l'intérêt de contrôler le procédé à cette échelle. Dans le cadre de nos travaux, il est donc choisi de se focaliser sur l'échelle globale et de développer une méthodologie de contrôle global complémentaire au contrôle local. Dans cette optique, plusieurs verrous seront à lever :

- la difficulté de prendre des mesures thermiques fiables, notamment à cause de la calibration du capteur thermique .
- le choix d'un ou plusieurs descripteur(s) optimal(ux) pour décrire l'accumulation de chaleur.

### III. Développement d'une méthode de mesure thermique

#### 1. Objectifs

Dans ces travaux, les développements de *monitoring* thermique ont été menés avec une caméra thermique sur les procédés WAAM et LMD. Prenant en considération les verrous relevés dans la littérature, les axes de travail poursuivis dans ce chapitre sont les suivants :

- l'étude approfondie de la calibration du capteur thermique .
- la discussion de plusieurs descripteurs thermiques à considérer en entrée de la boucle de contrôle .
- le développement d'une boucle de contrôle complète à partir d'un ou plusieurs descripteur(s) identifié(s) .
- l'étude de l'impact de la boucle de contrôle implémentée sur les performances des procédés et la qualité des pièces.

## 2. Montages expérimentaux et post-traitement des données

La thermographie est un moyen de mesure adapté aux présents travaux de *monitoring* thermique, de par sa capacité à acquérir des mesures à hautes températures – de l'ordre de 1000°C à 2000°C – comme celles mises en jeu en Fabrication Additive métallique, de manière non-intrusive. Ainsi, une caméra infrarouge FLIR A615 a été sélectionnée pour mener ces développements de *monitoring* thermique. Elle est composée d'une lentille de distance focale minimum de 300 mm et d'un capteur micro bolométrique non refroidi de 640x480 pixels qui capte les radiations électromagnétiques entre 7,5 et 14  $\mu\text{m}$ , avec une résolution minimale de 50 mK.

Les montages expérimentaux de mesure thermique pour les procédés LMD et WAAM sont illustrés respectivement en Figure 2-2 et Figure 2-3. Pour chaque procédé, la caméra thermique est placée fixe, loin de la zone de dépôt, afin de pouvoir contenir la pièce dans son champ de mesure tout au long de la fabrication. Dans le cas présent, les distances moyennes de mesure sont d'environ 300 mm et 800 mm, respectivement dans les environnements de fabrication LMD et WAAM. Les résolutions des images thermiques correspondantes sont de 0,2 et 0,5 mm/pixel. Aux regards des tailles caractéristiques mentionnées en Figure 2-1, ces résolutions permettent de décrire les champs thermiques à l'échelle des couches pour les deux procédés. A titre d'exemple, une couche de 1mm en LMD ou une couche de 2,5mm en WAAM est décrite en 5 pixels. Cependant, ce montage expérimental ne permet pas a priori de capturer finement les champs thermiques à l'échelle du bain de fusion. En effet, les tailles caractéristiques du bain de fusion couvrent seulement 1 ou 2 pixels de l'image thermique, ce qui ne permet pas une description suffisante des gradients thermiques au sein du bain de fusion.

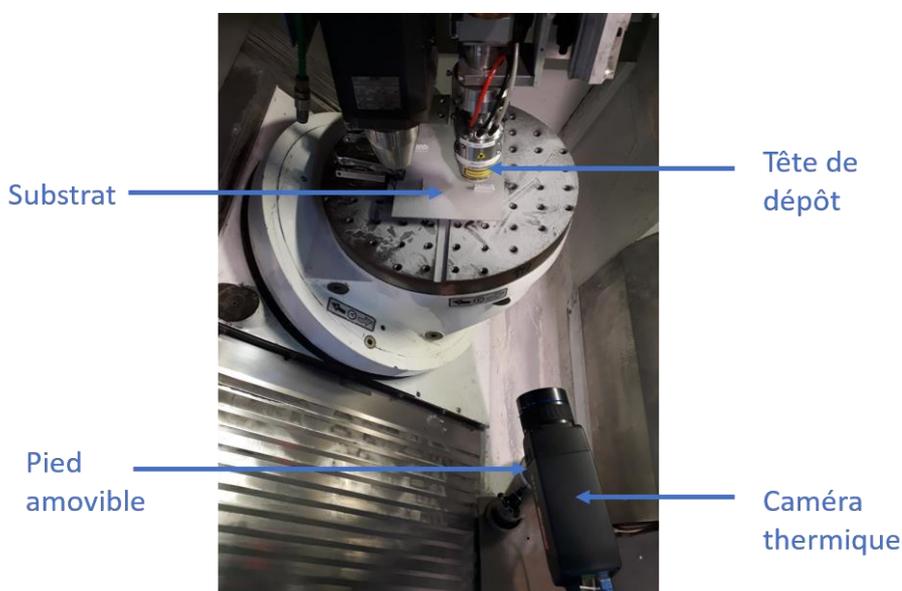


Figure 2-2 : montage expérimental pour le monitoring thermique appliqué au procédé LMD.



Figure 2-3 : montage expérimental pour le monitoring thermique appliqué au procédé WAAM.

Dans ces travaux, les acquisitions thermiques sont effectuées avec le logiciel DyVAS. Les images brutes en niveau de gris sont recueillies depuis la caméra thermique codées sur 16 bits, puis converties en images thermiques via un code MATLAB® développé dans le cadre de cette thèse. Un exemple d'image thermique en cours de dépôt WAAM est illustré en Figure 2-4 : les champs thermiques à la surface de la pièce peuvent y être étudiés. En particulier, on note un important gradient de couleur au sein de la pièce, lié à l'apport de chaleur en cours de dépôt. On observe également une zone plus froide directement derrière le point de dépôt, qui est liée au refroidissement local du cordon dû au flux de gaz protecteur. Dans cette configuration, la mesure globale ne permet pas d'appréhender les phénomènes locaux au bain de fusion puisque ce dernier est décrit sur quelques pixels. En ce sens, il conviendrait d'approcher la caméra thermique de la pièce afin d'adapter la résolution de l'image à l'échelle souhaitée.

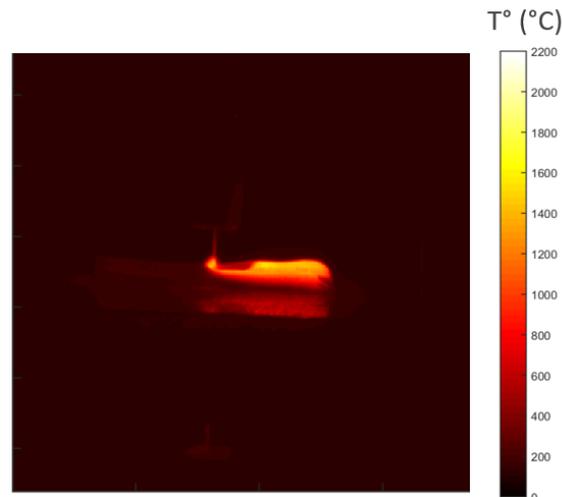


Figure 2-4 : exemple d'image thermique in-situ acquise par la caméra thermique infrarouge.

Dans le développement de notre méthode de mesure thermique, la résolution d'image et la fréquence d'acquisition sont deux paramètres clés. En effet, une résolution et une fréquence d'acquisition trop faible ne permettront pas de décrire les vitesses de refroidissement au sein de la pièce. A l'inverse, une fréquence d'acquisition trop grande et une résolution trop fine augmenteront la taille des données à traiter et pourra limiter une implémentation en temps réel. Dans ces travaux, une résolution d'environ 0,5 mm/pixel et une fréquence d'environ 2 Hz (soit approximativement 1 image toutes les 0,5 s) ont été choisies comme compromis afin de réaliser un contrôle en temps réel à partir des champs thermiques à la surface de la pièce.

La méthode de mesure thermique proposée ici ne convient pas à tout type de matériaux mis en œuvre en Fabrication Additive métallique. Notamment, des difficultés de mesures ont été relevées dans le cas des matériaux dont le dépôt génère des fumées qui modifient les propriétés émissives des cordons précédemment déposés. C'est le cas des alliages d'aluminium, dont de premiers essais de mesures thermiques à des fins de calibration d'émissivité sont illustrés en Figure 2-5. Il convient de remarquer une différence d'état de surface entre le dernier cordon et les précédents. La mesure thermique globale mise en œuvre ici ne permet pas d'estimer correctement la température dans les deux zones décrites, puisque les propriétés émissives sont trop éloignées. Pour ce type de matériau, l'utilisation de deux capteurs, visant les différentes zones relevées, permettrait de pallier le problème évoqué.

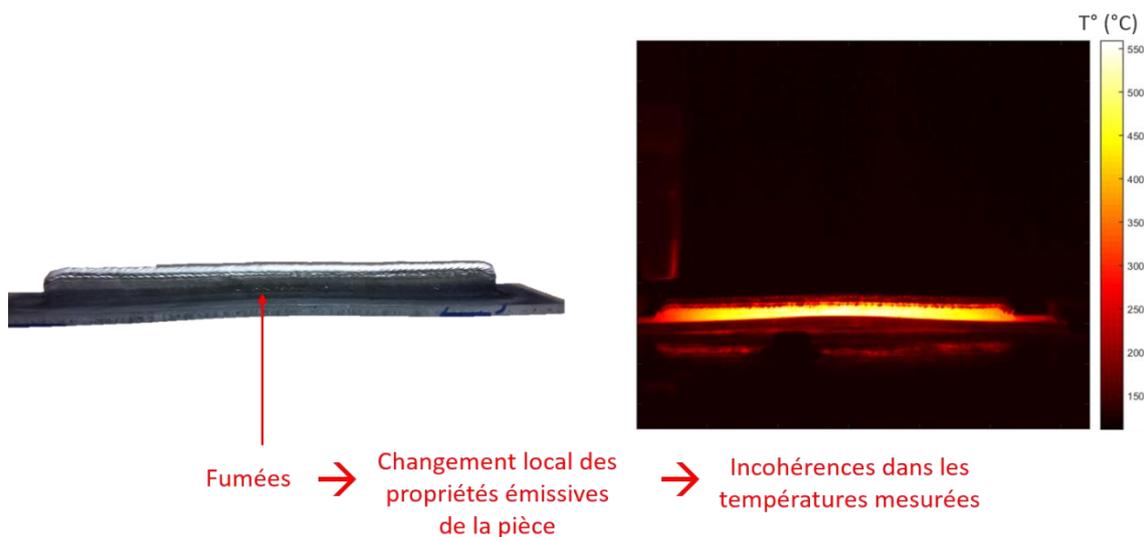


Figure 2-5 : mise en évidence d'une limitation de la méthode de mesure pour les dépôts WAAM en alliage d'aluminium.

Les difficultés rencontrées et illustrées en Figure 2-5 permettent d'appuyer l'importance du trio {capteur, procédé, matériau}. D'une part, le type et le nombre de capteurs doivent être choisis en fonction des matériaux et de la zone d'intérêt à contrôler – bain de fusion, ou différentes zones de matériau solidifié. La taille caractéristique de ces zones et la finesse du contrôle souhaité régissent la résolution du capteur thermique employé. Enfin, la fréquence d'échantillonnage est propre au procédé ainsi qu'aux cinétiques de refroidissement du matériau considéré. Au-delà du choix de capteur et du montage expérimental choisi dans ces travaux, il convient d'insister sur le caractère générique de la méthode de contrôle thermique proposée ici et la possibilité de l'utiliser pour d'autres cas d'applications – matériau, procédé, géométrie. Concernant la mesure thermique de structures à géométries complexes et surfaces non planes, notre méthode pourrait être étendue dans de futurs travaux avec l'utilisation de plusieurs capteurs et d'algorithmes de reconstruction de surface [Koutsoudis 2014].

### 3. Calibration du capteur et qualification de la mesure

L'opérateur doit renseigner plusieurs paramètres afin de calibrer la caméra et d'assurer la validité des mesures : ces paramètres sont reportés en Tableau 2-1.

Tableau 2-1 : liste des paramètres à renseigner pour la calibration de la caméra thermique FLIR A615.

Paramètre de calibration	Déterminé par	Valeurs
Distance à l'objet	Montage expérimental	De 300 à 800 mm suivant le procédé
Taux d'hygrométrie	Procédé	50%
Température de l'environnement	Procédé	20°C
Plage de température de mesure	Procédé	300°C – 2000°C
Emissivité	Matériau	<b>A étudier</b>

Comme indiqué en Tableau 2-1, la plupart des paramètres de calibration de la caméra sont fixés par le procédé ou le montage expérimental. Seul le facteur d'émissivité, lié aux propriétés du matériau déposé, n'est pas trivialement fixé. Or, comme déjà mentionné dans les verrous, l'émissivité est un paramètre matériau difficile à déterminer, qu'il est donc crucial d'étudier afin de garantir la validité des acquisitions thermiques *in-situ*. Cependant, on sait d'ores et déjà que la calibration de ce facteur ne permettra pas d'estimer simultanément les champs thermiques à l'échelle globale du matériau solidifié et au niveau du bain de fusion, à cause de sa dépendance à l'état solide ou liquide du matériau. Dans l'objectif de la construction d'une méthode de contrôle global, la calibration de la caméra sera destinée aux champs thermiques de la pièce solidifiée et ne permettra pas une bonne description des champs thermiques au niveau du bain de fusion.

### 3.1. *Rappels sur le principe de la thermographie*

Afin de comprendre les travaux de calibration de la caméra, cette section a pour but de rappeler les principales équations de la thermographie, nécessaire à l'analyse des données thermiques. La thermographie est une technique permettant de mesurer les rayonnements électromagnétiques émis par une scène pour des longueurs d'ondes allant de 0,1 à 100  $\mu\text{m}$  et d'en obtenir l'image thermique. La grandeur relative au rayonnement thermique est la luminance spectrale, notée  $L$ , qui représente le flux de lumière émis en un point d'une surface dans une direction donnée et dépend, entre autres, de la température du corps ainsi que la longueur d'onde. La thermographie repose sur la théorie du rayonnement du corps noir, décrite de façon très détaillée dans les travaux de Mattei et Pajani [Mattei 2005, Pajani 2013].

Le corps noir est un objet idéal absorbant parfaitement toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre. Ainsi, la luminance spectrale d'un corps noir peut être définie selon la loi de Stefan-Boltzmann :

$$L_{T,\lambda}^0 = \sigma T^4 \quad \text{Equation 1-1}$$

Où:

- $L_{T,\lambda}^0$  est la luminance spectrale totale d'un corps noir, exprimé en  $\text{W.m}^{-2}$ ,
- $T$  est la température absolue du corps noir, exprimé en  $^\circ\text{K}$ ,
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

En pratique, les corps réels ne respectent quasiment jamais les hypothèses du corps noir. Ils sont plutôt considérés comme des corps opaques, réfléchissant et absorbant une fraction des rayons incidents. Ainsi, quelles que soient la longueur d'onde et la température d'intérêt, tout corps réel émet plus de rayonnement qu'un corps noir. Le rapport entre la luminance d'une source réelle et celle d'un corps noir, à  $\lambda$  et  $T$  fixées, définit l'émissivité spectrale de la source :

$$\varepsilon_{T,\lambda} = \frac{L_{T,\lambda}}{L_{T,\lambda}^0} \quad \text{Equation 1-2}$$

Où:

- $\varepsilon_{T,\lambda}$  est l'émissivité spectrale d'un corps réel,
- $L_{T,\lambda}$  est la luminance spectrale totale d'un corps réel, exprimé en  $\text{W.m}^{-2}$ .

Pour décrire le rayonnement d'un corps opaque, la loi de Stefan-Boltzmann devient :

$$L_{T,\lambda} = \varepsilon_{T,\lambda} \sigma T^4 \quad \text{Equation 1-3}$$

De manière générale, une caméra thermique mesure un flux lié à la luminance  $L$  et utilise l'Equation 1-3 pour donner une information de température. Ainsi, dans le cas présent, la mesure de température avec la caméra thermique est un problème inverse qui dépend du paramètre d'émissivité. Il est donc nécessaire de déterminer ce paramètre correctement. Cependant, comme évoqué précédemment, cette détermination n'est pas triviale, car l'émissivité est une propriété du matériau variant suivant l'état de surface, la température et la longueur d'onde du corps.

Dans la littérature, de nombreuses valeurs d'émissivité sont reportées pour une large gamme d'environnements et de matériaux [Mattei 2005]. Cependant, ces valeurs correspondent en grande majorité à des cas idéaux - acier poli, meulé, oxydé à 800°C, sablé etc... - et des atmosphères non représentatives d'un environnement de fabrication. En pratique, l'utilisation immédiate de ces valeurs dans un environnement de fabrication conduit le plus souvent à une surévaluation de la température [Mattei 2005]. En particulier, les erreurs de mesure engendrées par une erreur de 1% dans la valeur d'émissivité ont été estimées en fonction de la longueur d'onde et de la température et sont reportées en Figure 2-6.

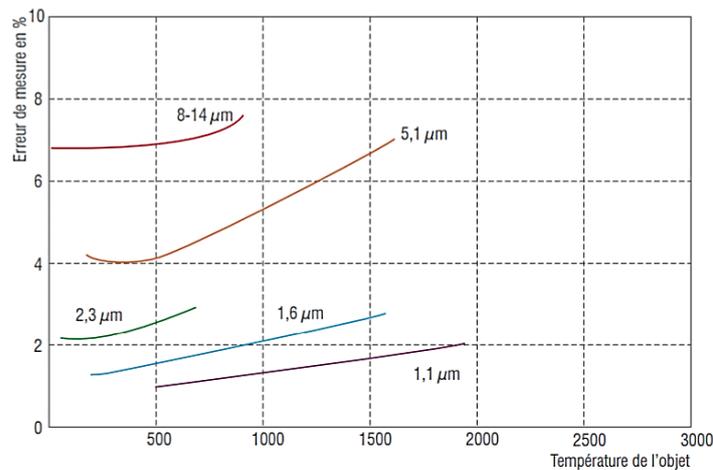


Figure 2-6 : conséquence d'une erreur de 1% sur l'émissivité sur les mesures optiques en fonction de la température et de la longueur d'onde [Mattei 2005].

D'autres causes d'erreur, tel que l'état de surface du corps, perturbent l'évaluation de l'émissivité et entachent la qualité de la mesure thermique. Par exemple, la rugosité influe fortement sur les valeurs d'émissivité, avec une augmentation jusqu'à 50% en cas de forte rugosité pour un acier inoxydable [Mattei 2005].

Dans ce contexte, il apparaît crucial de déterminer les émissivités adaptées à notre application de contrôle, c'est-à-dire pour les matériaux et états de surface rencontrés en Fabrication Additive DED, ainsi que pour les plages de températures mises en jeu en cours de dépôt.

### 3.2. Détermination du facteur d'émissivité pour la calibration de la caméra thermique

La méthode de détermination de l'émissivité développée dans ces travaux est inspirée de celle proposée par Yang *et al.* pour le contrôle thermique du procédé WAAM [Yang 2017]. Dans ses travaux, Yang a comparé les mesures de la caméra thermique avec des mesures thermocouples insérés dans un mur monocordon lors d'une phase de chauffage du mur après fabrication afin d'ajuster l'émissivité. Dans notre cas, des mesures via thermocouple au niveau du mur sont également considérées comme référence pour ajuster l'émissivité, mais la comparaison des mesures est directement effectuée en cours de dépôt après insertion du thermocouple. Cette méthode de détermination de l'émissivité est générique et peut être appliquée à tous les procédés DED.

Le thermocouple est inséré dans le mur de la manière suivante : 1) dépôt de quelques cordons, 2) arrêt de la fabrication, 3) mise en position du thermocouple au milieu du mur et 4) reprise de la fabrication. Le passage de la torche entraîne le soudage du thermocouple dans le mur sans le détériorer. A partir de l'insertion du thermocouple dans le mur, la température en cours de dépôt est mesurée localement par le thermocouple et globalement par la caméra thermique pour différentes émissivités. Afin de comparer les deux moyens de mesure, la température est moyennée sur les pixels autour du thermocouple dans les images thermiques.

La méthode de détermination de l'émissivité proposée peut s'appliquer à tous les procédés DED. Ici, elle va être particulièrement illustrée sur les procédés WAAM et LMD, avec des matériaux de la famille des aciers inoxydables, 316L dans le cas du LMD et Duplex 2209 dans le cas du WAAM.

- Exemple de calibration pour le procédé WAAM

Le montage expérimental pour la calibration de la caméra thermique dans le cas du dépôt d'un Acier Duplex avec le procédé WAAM est illustré en Figure 2-7. La photo correspondante a été prise lors de l'étape 3) de la méthode d'insertion du thermocouple dans le mur pour obtenir des mesures de référence.

La Figure 2-8 illustre l'évolution des écarts entre les mesures infrarouges et via thermocouple, pour des émissivités allant de 0,6 à 0,9. Les deux séries de mesures ont été comparées en phase de dépôt, soit dans une plage de température entre 1000°C et 1600°C. A l'analyse du graphe de la Figure 2-8, la valeur de 0,7 résulte en une mesure de température la plus proche de la température de référence. La valeur absolue de l'écart maximal entre la température mesurée par la caméra et celle donnée par le thermocouple est de 60°C au début de la fabrication, puis reste en-dessous de 20°C jusqu'à la fin du dépôt. Ainsi, nous pouvons conclure que l'émissivité de 0,7 permet d'estimer la température réelle de la pièce avec une incertitude de 20°C.

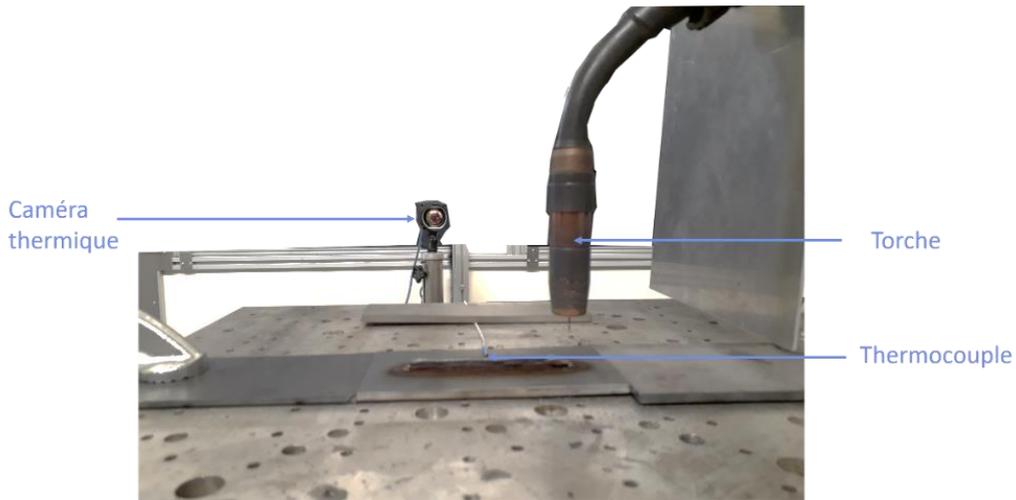


Figure 2-7 : montage expérimental pour la calibration de la caméra thermique pour le procédé WAAM.

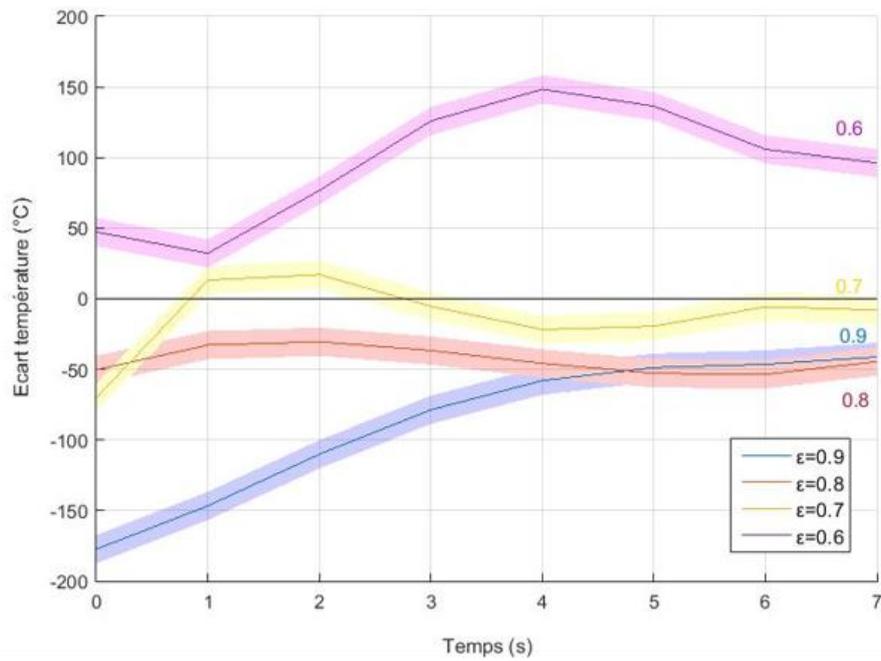


Figure 2-8 : évolution des écarts entre les mesures infrarouges et thermocouple pour la détermination de l'émissivité pour l'acier duplex déposé avec le procédé WAAM.

- Exemple de calibration pour le procédé LMD

Pour le procédé LMD, la calibration est menée sur de l'acier inoxydable 316L. Le spécimen fabriqué pour l'étude est illustré en Figure 2-9, A l'instar de la Figure 2-8, la Figure 2-10 présente les écarts entre l'évolution de température mesurée par la caméra thermique et celle mesurée par le thermocouple de référence. Dans ce cas, la comparaison est faite sur 5 couches. Au vu des résultats de la Figure 2-10, une émissivité de 0.65 permet d'effectuer des mesures thermiques avec une incertitude de 50°C.



Figure 2-9 : illustration du thermocouple inséré dans le mur lors de la calibration de l'émissivité pour le procédé LMD.

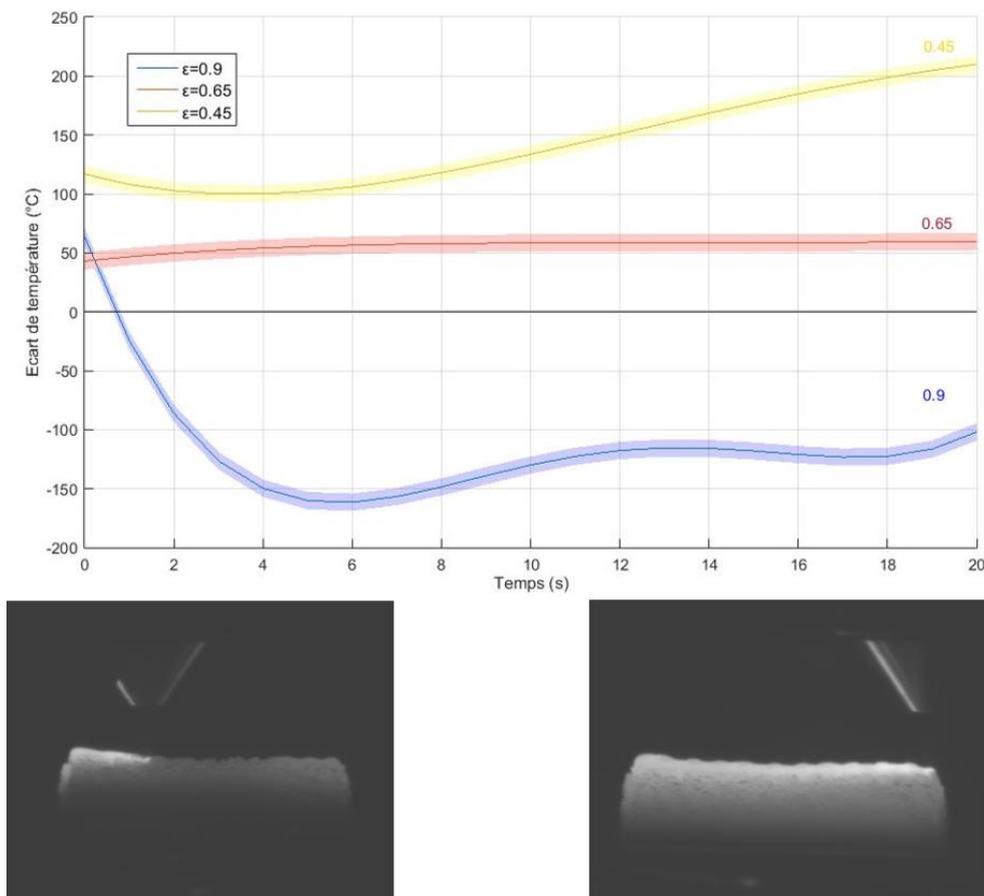


Figure 2-10 : Evolution des écarts entre les mesures infrarouges et thermocouple pour la détermination de l'émissivité pour l'acier duplex déposé avec le procédé LMD.

### 3.3. Etude de répétabilité de la mesure thermique

Les tests de répétabilité de la mesure thermique ont été menés sur le WAAM. Dans cette étude, un mur monocordon en acier duplex a été fabriqué trois fois suivant le même protocole opératoire. Deux fabrications (essais 1 et 2) ont été effectuées à la suite, avec le même montage expérimental et la troisième un jour différent (essai 3). Dans cette étude, nous considérons la température atteinte par la pièce à la fin du refroidissement d'une couche, juste avant le démarrage du dépôt de la suivante. Les évolutions des températures correspondantes pour les trois fabrications sont tracées en Figure 2-11. Ces températures ont été calculées en considérant la température maximale de chaque image thermique, ce qui sera justifié par la suite.

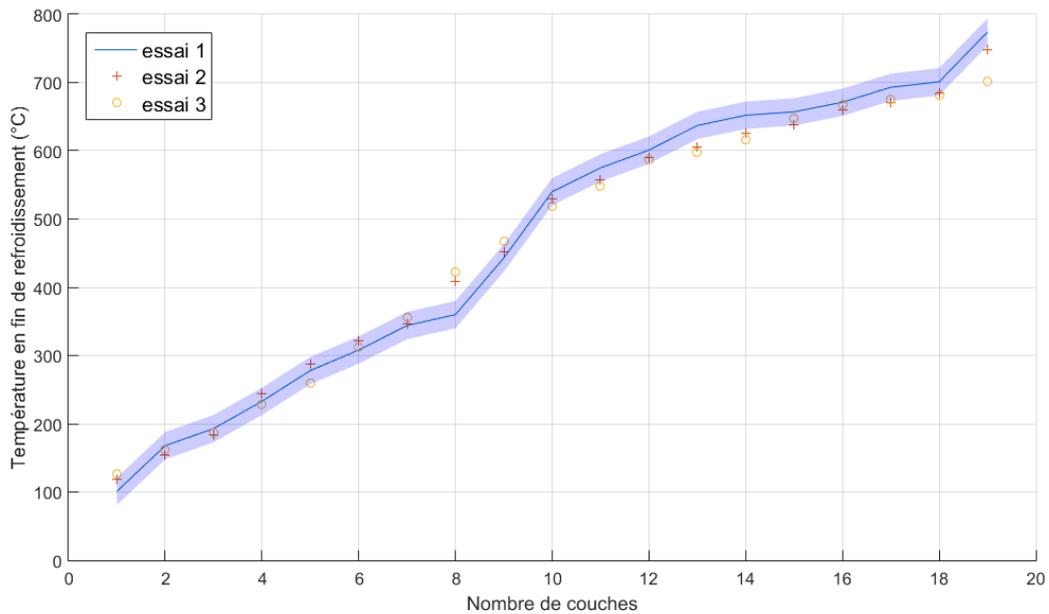


Figure 2-11 : test de répétabilité de mesure thermique en cours de dépôt WAAM. Etude de la température en fin de refroidissement à chaque couche.

En Figure 2-11, nous pouvons constater que la température de la pièce en fin de refroidissement augmente couche après couche. Par ailleurs, nous notons que les valeurs de températures des essais 2 et 3 sont majoritairement comprises dans l'incertitude de mesure de la première série de mesure, ce qui valide la répétabilité de mesure de notre approche expérimentale.

## 4. Bilan

Dans cette section, une méthode de mesure avec une caméra thermique infrarouge a été proposée. Les différents travaux présentés ont permis de s'assurer que les données générées par la caméra thermique étaient valides pour construire une stratégie de monitoring thermique des procédés DED. Par ailleurs, une méthode expérimentale générique a été proposée pour déterminer les facteurs d'émissivité propres aux matériaux

et températures mis en jeu en Fabrication Additive métallique. En particulier, une émissivité de 0,7 est retenue pour calibrer la caméra thermique dans l'optique de contrôler la fabrication en acier inoxydable duplex par le procédé WAAM. Cette valeur d'émissivité est considérée avec une incertitude de mesure de 20°C en WAAM et 50°C en LMD pour les températures mesurées. Dans de futurs travaux, d'autres approches pour déterminer l'émissivité, comme des approches analytiques, pourraient être investiguées pour notre application [Rousseau 2011].

A partir de la méthode de mesure présentée, il s'agit maintenant de proposer une boucle de contrôle thermique global à mettre en œuvre dans la stratégie de *monitoring* multiphysique développée dans ces travaux.

## IV. Développement d'une boucle de contrôle thermique global

### 1. Approche de *monitoring* thermique global

L'approche de *monitoring* thermique global proposée dans ces travaux est illustrée en Figure 2-12. Un capteur thermique, placé fixe dans l'environnement de fabrication, prend des images de la pièce en cours de fabrication, qui sont traitées en temps réel afin d'obtenir les champs thermiques à la surface de la pièce. Un ou plusieurs descripteurs thermiques peuvent être extraits de ces images thermiques, pour agir sur la stratégie de fabrication en cours ou entre les phases de dépôt.

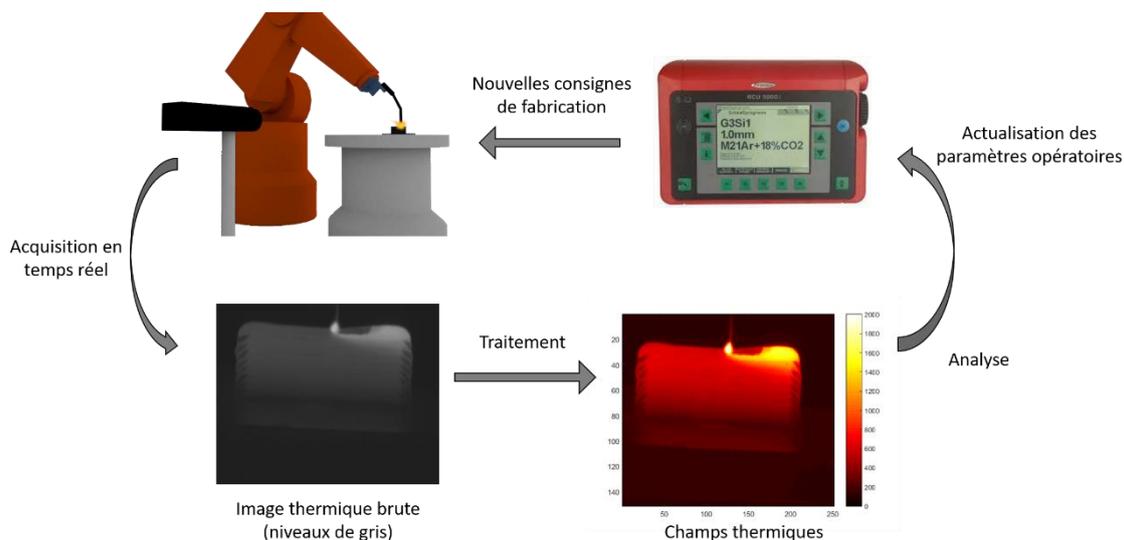


Figure 2-12 : approche de *monitoring* thermique global proposée dans ces travaux.

Dans ces travaux, une boucle de contrôle thermique va être développée à partir de la méthode de mesure précédemment présentée.

## 2. Choix d'un descripteur thermique

Le montage expérimental présenté à la Section III.2 permet, moyennant l'adaptation de la fréquence d'acquisition et de la résolution de l'image de la caméra :

- d'accéder aux évolutions des champs de température et de la température maximale au sein de la pièce ( $T_{\max}$ ) .
- de calculer les vitesses de refroidissement en tout point de la surface de la pièce, les gradients thermiques dans la direction de fabrication ou des cordons .
- d'identifier des Zones à Haute Température (ZHT).

Dans ces travaux, il est choisi d'investiguer le potentiel de contrôle en temps réel avec les données ZHT et  $T_{\max}$ . D'une part, elles sont considérées comme particulièrement adaptées pour décrire les phénomènes thermiques intervenant à l'échelle de la pièce pendant la fabrication DED. D'autre part, ces dernières ont déjà fait l'objet d'études prometteuses dans la littérature [Karnati 2013, Yang 2017].

### 2.1. Zone à Haute Température (ZHT)

La notion de ZHT dépend du matériau et de son diagramme de transformation. Cette notion a été proposée dans la littérature, mais les perspectives de contrôle liées à cette donnée ont rarement été abordées [Karnati 2013, Yang 2017].

Dans ces travaux, nous choisissons de définir la Zone à Haute Température (ZHT) comme étant la portion solidifiée de la pièce réchauffée à haute température par le passage de la torche. Le domaine des « hautes températures » est défini par un seuil. Dans une démarche exploratoire, une température de 1000°C a été choisie dans ces travaux afin d'investiguer des perspectives de contrôle avec la ZHT, que l'on notera  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$ . Dans de futurs travaux, il conviendra d'affiner la température seuil afin d'étendre les perspectives de contrôle associée à cette grandeur physique.

A titre d'exemple, la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  est mise en évidence dans une image thermique en cours dépôt LMD en Figure 2-13. En cours de fabrication, la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  est détectée automatiquement pour chaque image thermique, via un traitement de seuillage et un algorithme de reconnaissance de forme de l'image binarisée, comme présenté en Figure 2-14.

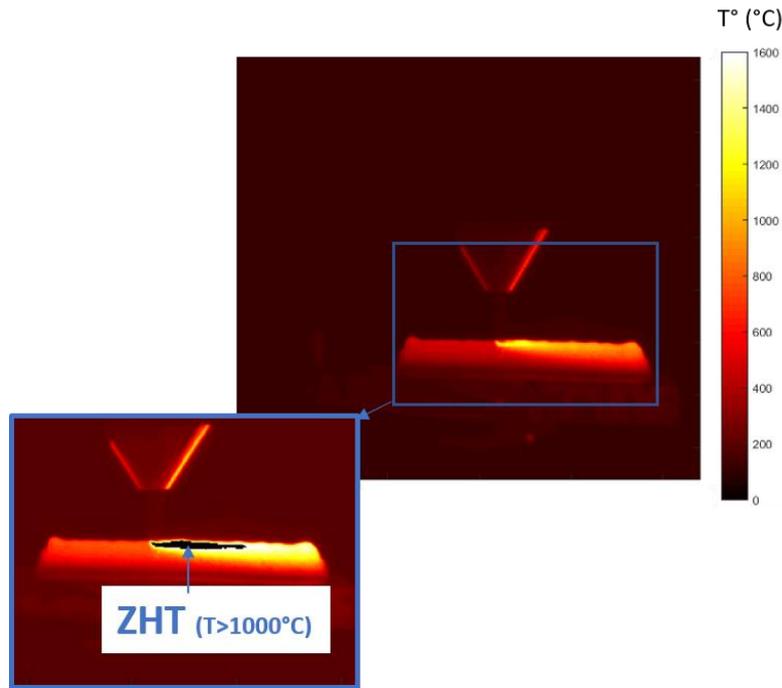


Figure 2-13 : mise en évidence de la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  au sein de la pièce en cours de dépôt LMD.

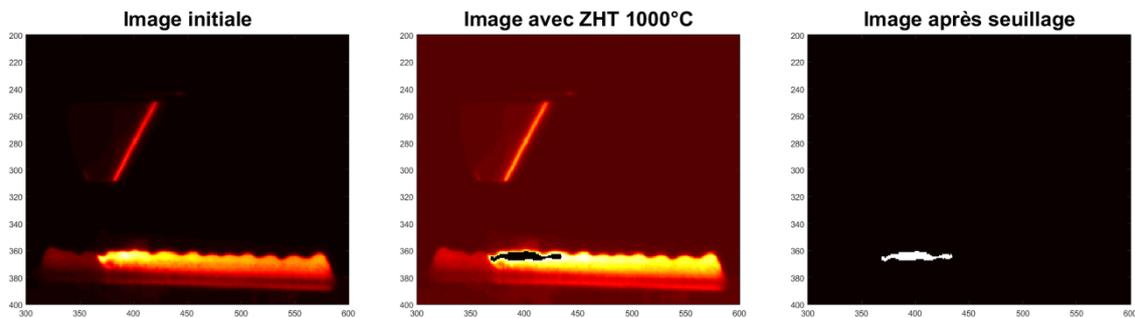


Figure 2-14 : détail du traitement d'image pour obtenir les caractéristiques de la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$ .

De manière générale, la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  est localisée derrière le bain de fusion – voir Figure 2-13. En cas d'augmentation de l'apport de chaleur ou de diminution des voies de transfert thermiques, cette  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  peut grossir en cours de fabrication. Ainsi, l'étude de la taille de la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  apparaît comme un moyen pertinent pour estimer l'accumulation de chaleur au sein de la pièce en cours de fabrication. C'est dans ce sens que se sont orientées les investigations de cette grandeur physique.

L'étude des perspectives de contrôle avec la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  a été conduite sur deux murs en acier inoxydable 316L fabriqués par le procédé LMD. Chaque mur est composé de 76 couches et les dimensions nominales sont fixées à 100 mm de longueur et 30 mm de hauteur. La hauteur de couche fixée est donc de 0,4 mm pour ce cas d'étude. Les paramètres opératoires utilisés pour les deux fabrications sont récapitulés en Tableau 2-2. Le premier mur, noté *mur A*, a été fabriqué avec un faible débit de poudre et aucune temporisation afin de forcer l'accumulation de chaleur en cours de fabrication. Le

deuxième mur, noté *mur B*, a été fabriqué avec un débit de poudre augmenté et une temporisation de 2s entre chaque couche, afin de favoriser le refroidissement de la pièce. Les deux murs fabriqués sont illustrés en Figure 2-15. Les évolutions de taille de  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  sont tracées en Figure 2-16 et certains états de ZHT sont illustrés en Figure 2-17.

Tableau 2-2 : paramètres opératoires utilisés pour l'étude de la grandeur physique ZHT.

	Mur A	Mur B
P	1300 W, couche 1 750 W, couche 2 → fin	
TS	1900 mm/min	
$Q_{\text{poudre}}$	12 g/min	20 g/min
Temporisation entre couches	0 s	2 s



Figure 2-15 : murs fabriqués dans le cadre de l'étude de la grandeur physique  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$ . (a) mur A (b) mur B.

En Figure 2-15, il convient de remarquer que le mur A n'atteint pas la hauteur nominale définie par le cahier des charges. Pour le même nombre de couches, la hauteur moyenne du mur B est conforme à la hauteur cible, mais présente des défauts de planéité.

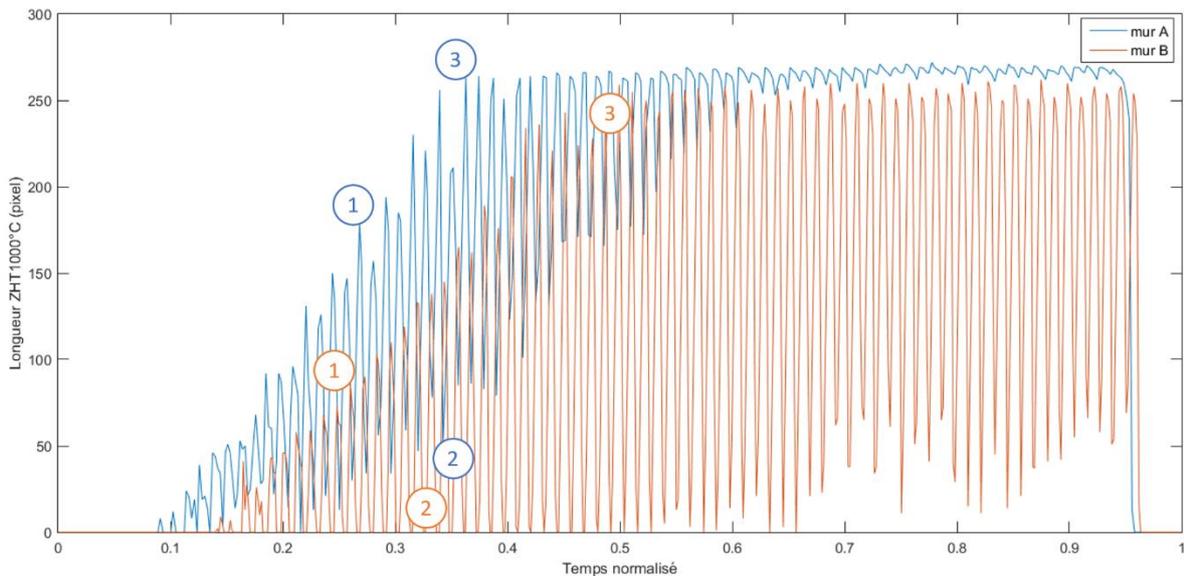


Figure 2-16 : évolution de la longueur de la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  en cours de fabrication des murs A et B.

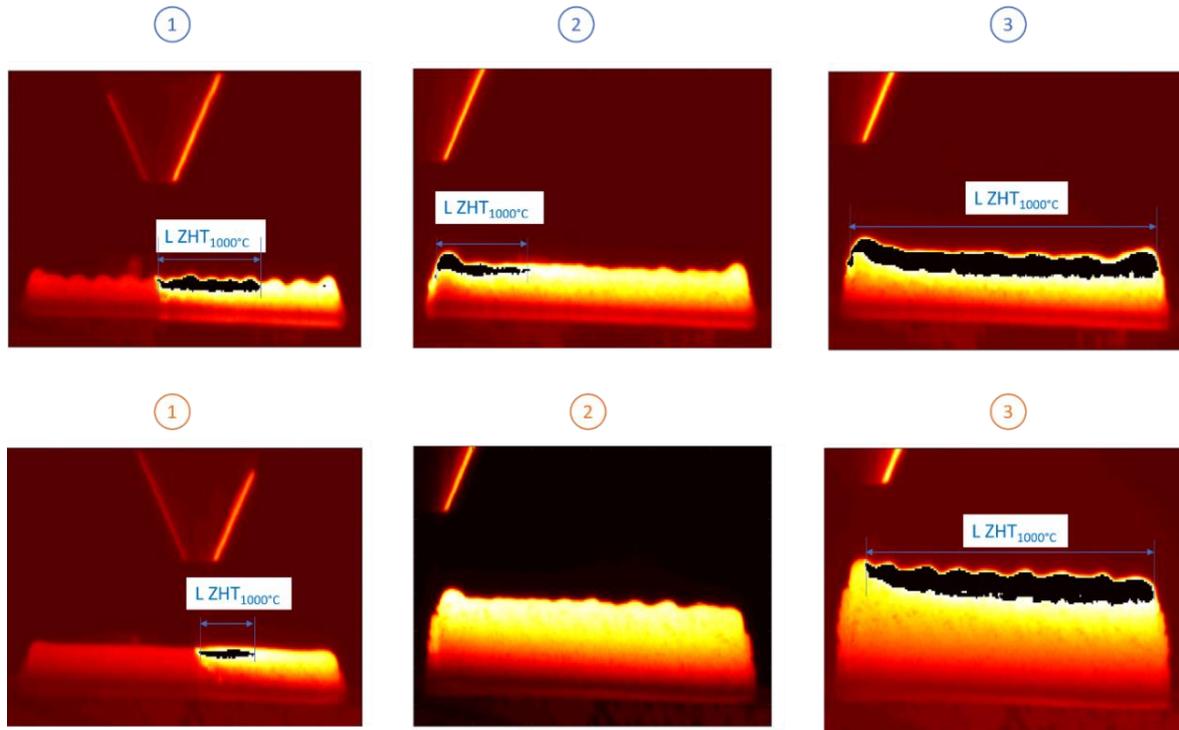


Figure 2-17 : illustrations de l'évolution de ZHT en cours de fabrication des murs A et B.

En Figure 2-17, les longueurs de  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  des deux murs augmentent tout au long de la fabrication. Dans le cas du mur B, l'ajout de la temporisation permet, d'une part, de refroidir la pièce en dessous de  $1000^{\circ}\text{C}$  entre les couches et d'autre part, de globalement diminuer la longueur de la ZHT en cours de dépôt. Il est important de remarquer qu'à partir de la moitié de la fabrication, les deux  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  atteignent toute la longueur de la pièce.

Cette analyse de la  $ZHT_{1000^{\circ}\text{C}}$  montre que les deux murs fabriqués souffrent d'une accumulation de chaleur importante en cours de fabrication. Or, le mur A n'atteint pas la hauteur cible, là où le mur B satisfait le cahier des charges. Outre la différence de paramètres opératoires entre les deux spécimens pouvant être responsable de cette augmentation de hauteur, ce cas d'étude permet une première mise en évidence d'une interdépendance des phénomènes thermique et géométrique. L'accumulation de chaleur a tendance à échauffer la pièce et à modifier la géométrie des cordons déposés. Notamment, les cordons ont tendance à s'affaisser, ce qui diminue la hauteur déposée à chaque couche. Cette diminution progressive de la hauteur de couche donne lieu à une augmentation du *Stick Out* (SO), comme le montrent les images thermiques de la Figure 2-18. Dans le cas du procédé LMD, cette variation de SO est particulièrement critique, puisqu'elle entraîne une défocalisation progressive du laser et avec elle une diminution de la grandeur de poudre déposée.

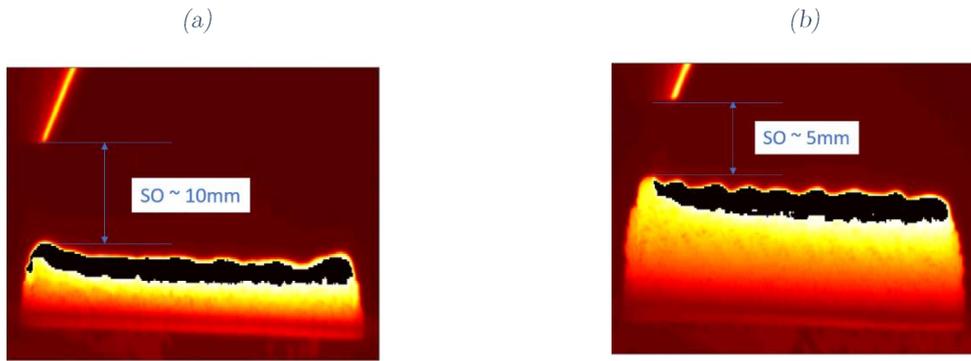


Figure 2-18 : estimation du SO à la fin des deux fabrications, (a) mur A, (b) mur B.

## 2.2. Température maximale ( $T_{max}$ )

Un exemple d'évolution de  $T_{max}$  mesurée par la caméra thermique pendant le dépôt WAAM d'un mur monocordon de 20 couches est reporté en Figure 2-19. Comme l'indiquent les images thermiques, l'information de  $T_{max}$  décrit successivement la température au bain de fusion en cours de fabrication et la température de la pièce en cours de refroidissement : les pics de température maximale sont atteints en phase de dépôt et les pentes décroissantes de  $T_{max}$  rendent compte du refroidissement de la pièce pendant les temporisations entre chaque couche.

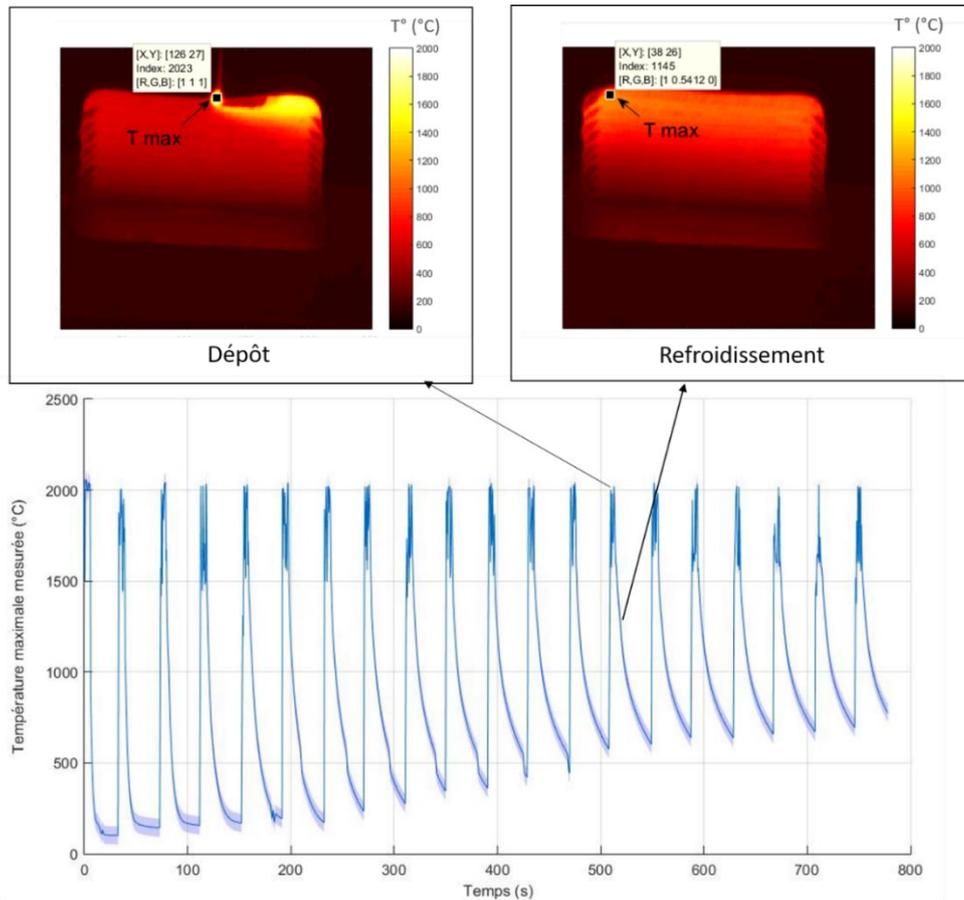


Figure 2-19 : évolution typique de la température maximale mesurée par la caméra thermique en cours de fabrication WAAM.

### 2.3. Bilan

Dans cette section, les descripteurs thermiques de Zone à Haute Température (ZHT) et Température maximale ( $T_{\max}$ ) ont été présentés. La ZHT permet de décrire l'accumulation de chaleur au sein de la pièce en cours de fabrication et de discriminer une bonne fabrication d'une mauvaise. Afin de développer un modèle de contrôle basé sur ce descripteur, une approche envisagée serait de construire une base de données avec les différentes tailles de ZHT relevées en essais et d'utiliser des algorithmes de traitement de données, tels que les réseaux de neurones [Hascoët 1989]. Dans ces travaux, il a été choisi de considérer la température maximale comme descripteur thermique. En effet, c'est une information ponctuelle qui peut être facilement extraite des images thermiques, puis comparée à un seuil via un algorithme de traitement simple dans des temps de traitement courts, compatibles avec une application en temps réel.

## 3. Proposition d'une boucle de contrôle thermique

A partir des discussions précédemment menées, une boucle de contrôle thermique global est proposée en Tableau 2-3. La température maximale mesurée par la caméra thermique est sélectionnée comme paramètre d'entrée de la boucle de contrôle. La commande du dépôt de la couche suivante a été choisie comme paramètre le plus simple à corriger afin de maîtriser l'évolution thermique de la pièce sans modifier les conditions de dépôt et la quantité de matière déposée [Cunningham 2018]. Cette boucle de contrôle thermique a été implémentée dans le cadre de ces travaux et ses effets sur la qualité de la pièce vont être présentés dans la section suivante.

Tableau 2-3 : boucle de contrôle thermique développée dans ces travaux.

<b>Descripteur thermique</b>	Température maximale mesurée par la caméra thermique
<b>Grandeur physique associée au descripteur</b>	Température de la pièce en phase de refroidissement
<b>Paramètre opératoire corrigé en sortie</b>	Départ cycle pour la couche suivante

D'autres boucles de contrôle thermique peuvent être construites à partir de la méthode de mesure proposée. Notamment, la ZHT pourrait être intégrée en donnée d'entrée de la boucle de contrôle. Concernant la correction, des approches complémentaires de refroidissement forcé peuvent être investiguées pour garantir le respect de la  $T_{\text{int}}$  tout en limitant l'impact sur l'efficacité du procédé [Wu 2018, Li 2018]. Ce type d'approche offrirait également des leviers supplémentaires pour maîtriser la microstructure par rapport à une action sur la temporisation entre couches [Cunningham 2018].

## V. Application d'une stratégie de *monitoring* thermique global au procédé WAAM

### 1. Introduction

L'objectif de cette étude est d'investiguer les impacts de la stratégie de *monitoring* thermique proposée, sur les caractéristiques des pièces finales, à travers l'implémentation de la boucle de contrôle thermique sur le procédé WAAM. Ce cas d'étude permettra de mettre en évidence l'intérêt d'intégrer ce type de contrôle thermique global dans une stratégie de *monitoring* multiphysique.

### 2. Méthode

#### 2.1. Démonstrateurs

Cette étude porte sur un mur monocordon de 20 couches en acier inoxydable duplex fabriqué avec le procédé WAAM. Les dimensions nominales du mur sont de 100 mm de longueur et 40 mm de hauteur. Les paramètres de puissance, vitesse de dévidage de fil (WFS) et vitesse d'avance (TS) sont identiques pour les deux configurations. Pour la fabrication sans contrôle, une temporisation entre couches est fixée constante à 30 s. Pour la fabrication contrôlée, le temps d'attente entre chaque couche varie conformément à la stratégie de contrôle thermique définie précédemment. Les paramètres opératoires utilisés dans la présente étude sont récapitulés en Tableau 2-4.

Tableau 2-4 : paramètres opératoires utilisés dans le cas d'application du monitoring thermique au procédé WAAM.

	Mur fabriqué sans contrôle	Mur fabriqué avec contrôle thermique
<b>P</b>	3760 W	
<b>WFS</b>	7,4 m/min	
<b>TS</b>	1000 mm/min	
<b>Temps d'attente entre couches</b>	Temporisation fixe 30 s	Variable selon le contrôle de $T^{\circ}_{int}$

#### 2.2. Matériaux

Les spécimens de cette étude sont fabriqués à partir de fil fourni par Böhler Welding (FRANCE), de diamètre 1,2mm en acier inoxydable duplex de type 2209. La composition chimique du matériau est reportée en Tableau 2-5. Des plaques carrées de 150 mm de côté et 5 mm d'épaisseur en acier de construction métallique S355 sont utilisées comme substrat. Le mur est déposé au milieu des plaques.

Tableau 2-5 : composition du fil d'acier duplex 2209 utilisé dans cette étude.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N
0.01 %	0.5 %	1.5 %	0.018 %	0.001 %	22.8 %	3.1 %	8.4 %	<0.1 %	0.15 %

### 2.3. Montage expérimental

Le montage expérimental pour le *monitoring* thermique du procédé WAAM est illustré en Figure 2-20. Les paramètres de calibration la caméra thermique sont reportés en Tableau 2-6, conformément à l'étude approfondie du capteur présentée en Section II.3.



Figure 2-20 : montage expérimental pour le monitoring thermique appliqué au procédé WAAM.

Tableau 2-6 : paramètres de calibration de la caméra thermique infrarouge pour le contrôle thermique.

Plage de température	300°C - 2000°C
Emissivité	0,7
Distance à l'objet	800 mm
Taux d'hygrométrie	50%
Température ambiante	20°C

### 2.4. Mise en œuvre de la boucle de contrôle thermique

La boucle de contrôle thermique est mise en œuvre sur le procédé WAAM comme schématisée en Figure 2-21. Pour chaque couche, des mesures thermiques sont menées en cours de dépôt puis en phase de refroidissement. Lors des phases de refroidissement,  $T_{\max}$  est calculée pour chaque image thermique et comparée à une température seuil. Concernant le seuil de contrôle, nous choisissons de considérer la température d'interphase, comme proposé dans plusieurs travaux de l'état de l'art [Denlinger 2016, Geng 2016, Yang 2018] et suggéré par Cunningham *et al.* dans le cas du procédé WAAM [Cunningham 2018]. Lorsque la température maximale mesurée par la caméra thermique descend en dessous de  $T_{\text{int}}$ , l'incrément du programme est commandée et la fabrication se poursuit.

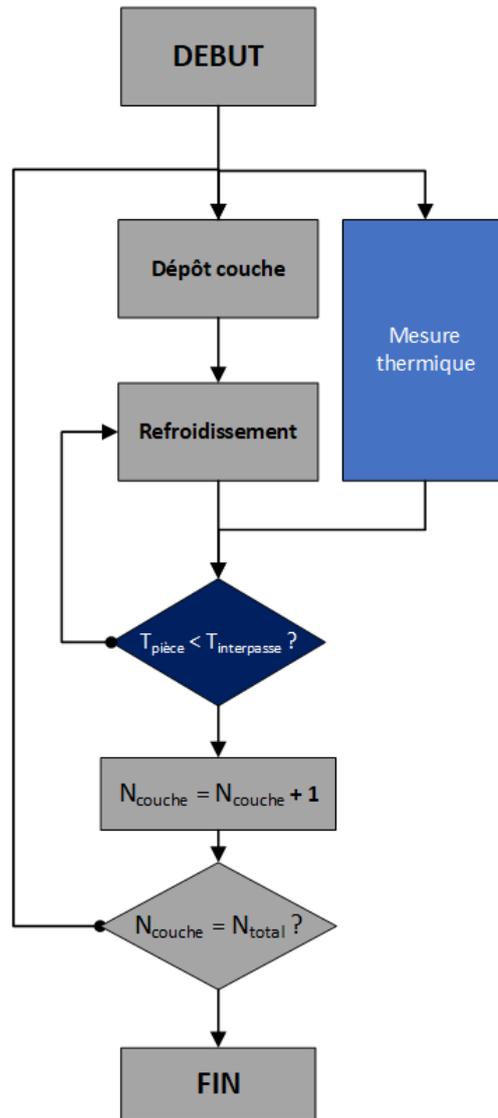


Figure 2-21 : algorithme de la stratégie de monitoring thermique développée dans ces travaux.

Le choix de  $T_{int}$  dépend principalement du matériau déposé et de ses transformations métallurgiques. Généralement, une haute  $T_{int}$  peut permettre, entre autres, de réduire les contraintes résiduelles dans le matériau, mais peut altérer la géométrie des cordons [Keeler 2011, Geng 2016]. A l'inverse, une  $T_{int}$  basse garantira une bonne tenue géométrique des cordons, mais pourra porter atteinte à l'efficacité du procédé en allongeant le temps de fabrication. Concernant l'acier duplex, il est montré que le contrôle de  $T_{int}$  entre chaque couche permet d'influencer l'équilibre des phases Austénitique et Ferritique [Keeler 2011, Petrovič 2011, Alvarez 2014]. En ce sens, plusieurs valeurs de  $T_{int}$  sont proposées comme seuil dans la littérature, principalement en fonction de l'apport d'énergie employé [Lundqvist 1977, Petrovič 2011, Alvarez 2014]. Dans ces travaux, une  $T_{int}$  de 200°C a été choisie au regard du matériau et de l'apport d'énergie inférieur à 1kJ/mm [Lundqvist 1977, Stützer 2019]. Par la suite, des méthodes numériques pourraient être employées afin de déterminer plus finement la  $T_{int}$  à considérer pour optimiser le temps de fabrication tout en conservant des propriétés mécaniques finales souhaitées [Denlinger 2016].

### 2.5. *Analyses post-fabrication*

En termes de microstructure, un équilibre final de  $50^{\pm 10}\%$  Ferrite -  $50^{\pm 10}\%$  Austénite est généralement visé pour les pièces en acier duplex, afin de garantir de bonnes propriétés mécaniques, telles que la ductilité et la résistance à la corrosion. Etant donnés les critères de microstructure, des mesures de pourcentage de Ferrite sont conduites sur les pièces fabriquées. En ce sens, un Ferritscope Fischer est utilisé, car il permet d'obtenir rapidement une proportion fiable du taux de Ferrite via des considérations de champ magnétique, sans préparation préalable de l'échantillon.

Une analyse complémentaire de la géométrie des couches est également effectuée sur des macrographies des murs avec un microscope 3D confocal Alicona. Les échantillons sont coupés au centre des murs, pour éviter les effets de bords liés aux arrêts/dépôts des dépôt. Une attaque électro-chimique avec de l'acide oxalique pendant 5 s est réalisée pour révéler les grains et l'interface entre les couches.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. *Démonstrateurs*

Les deux murs fabriqués dans le cadre de l'étude sont présentés en Figure 2-22. Les temps de fabrication sont respectivement de 40 min et 10 min pour les murs contrôlé et non contrôlé. Une augmentation de hauteur de 2,5 mm peut être notée pour le spécimen contrôlé. Cette observation permet d'ores-et-déjà de montrer l'intérêt d'appliquer une stratégie de contrôle thermique global à la fabrication et de mettre en évidence l'impact des phénomènes thermiques sur la géométrie de la pièce. La hauteur cible de 40 mm n'étant cependant pas atteinte par le mur contrôlé, cela permet également de montrer la nécessité de coupler plusieurs stratégies de contrôle dans une stratégie de *monitoring* multiphysique afin de fabriquer des pièces conformes au cahier des charges fixé.

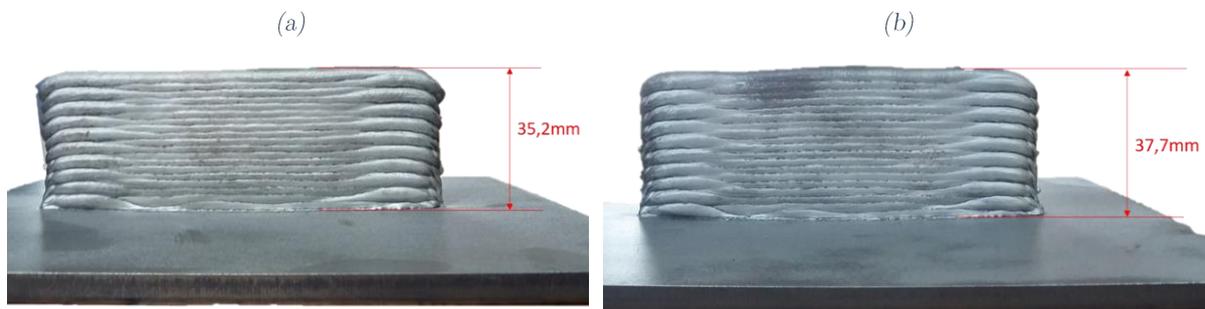


Figure 2-22 : murs fabriqués dans le cadre de l'application du *monitoring* thermique au procédé WAAM.  
(a) mur fabriqué sans contrôle, (b) mur fabriqué avec contrôle de la température d'interpasse.

### 3.2. *Analyse des mesures thermiques in-situ*

Les températures mesurées par la caméra thermique en cours de fabrication sont présentées en Figure 2-23.a. Nous constatons que  $T_{\text{int}}$  augmente rapidement dans le cas

du mur non contrôlé, dépasse le seuil de 200°C fixé par la stratégie de contrôle dès la troisième couche et atteint plus de 700°C en fin de fabrication. Dans le cas du mur contrôlé, on observe que le seuil de 200°C a été respecté grâce à l'ajustement du temps d'attente reporté en Figure 2-23.b. Concernant l'évolution des temporisations avec le contrôle thermique, une croissance linéaire peut être observée à partir des données expérimentales de la Figure 2-23.b.

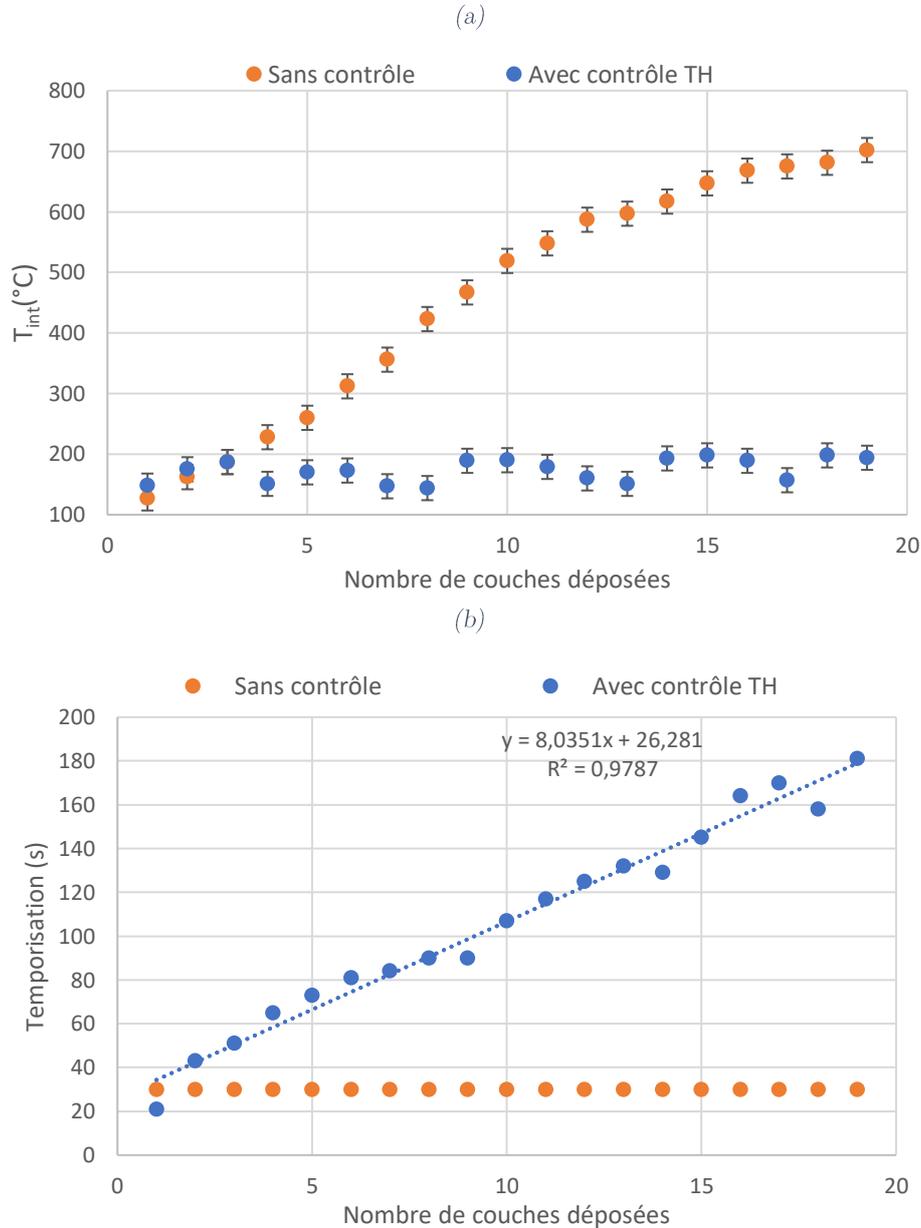


Figure 2-23 : (a) évolution de  $T_{int}$  mesurée et (b) évolution du temps d'attente entre chaque couche, pour les deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM.

### 3.3. *Etude qualitative des pièces post-fabrication*

#### Etude de la géométrie des couches

Dans un premier temps, les dimensions des couches sont étudiées à partir des macrographies présentées en Figure 2-24. Pour chaque mur, les couches ont été numérotées et leurs contours ont été accentués afin de mesurer les hauteur et largeur effective des couches. Les évolutions des hauteurs et largeurs effectives de couches des deux murs sont tracées en Figure 2-25.

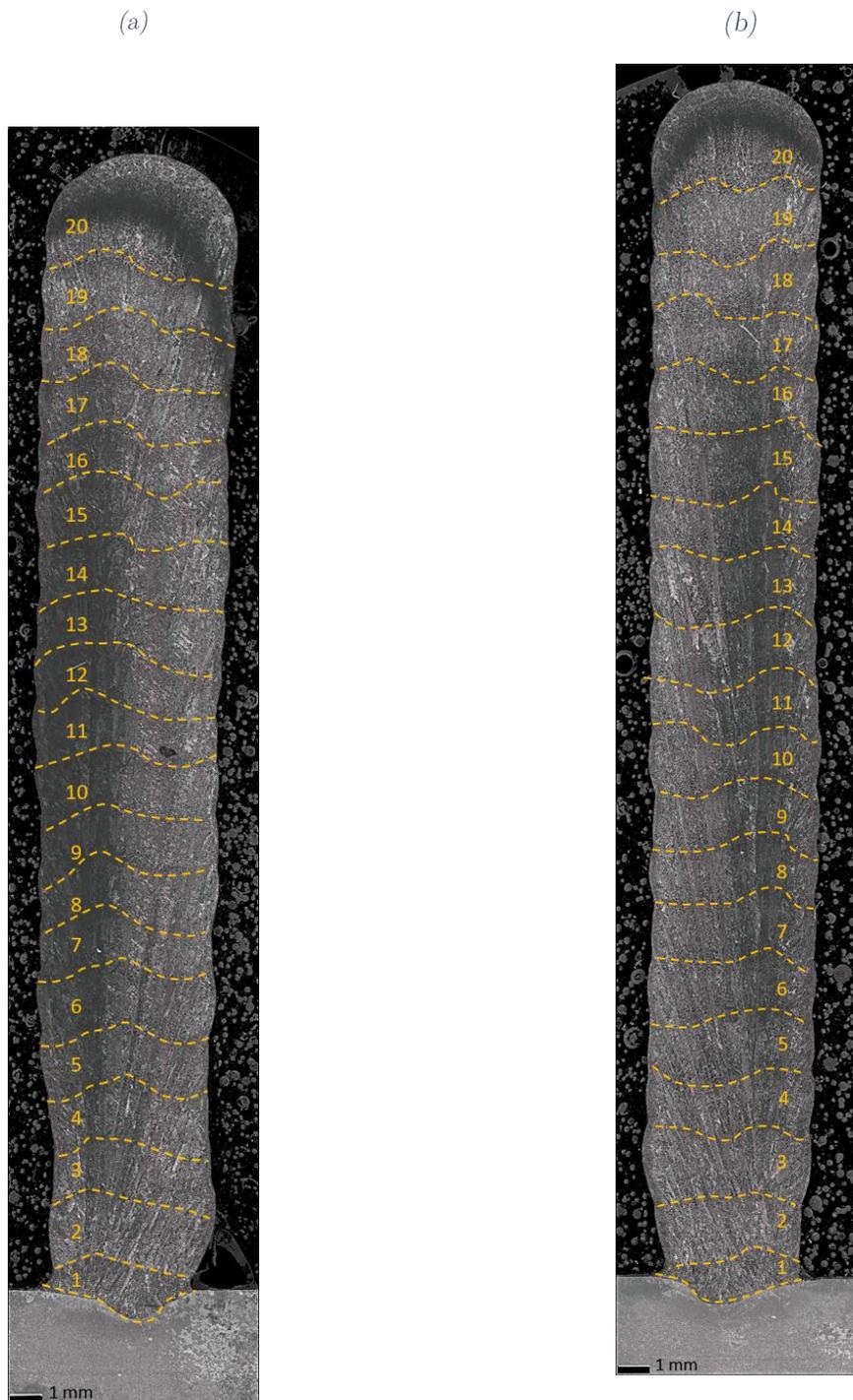


Figure 2-24 : macrographies des deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du *monitoring* thermique au procédé WAAM. (a) mur non contrôlé, (b) mur contrôlé.

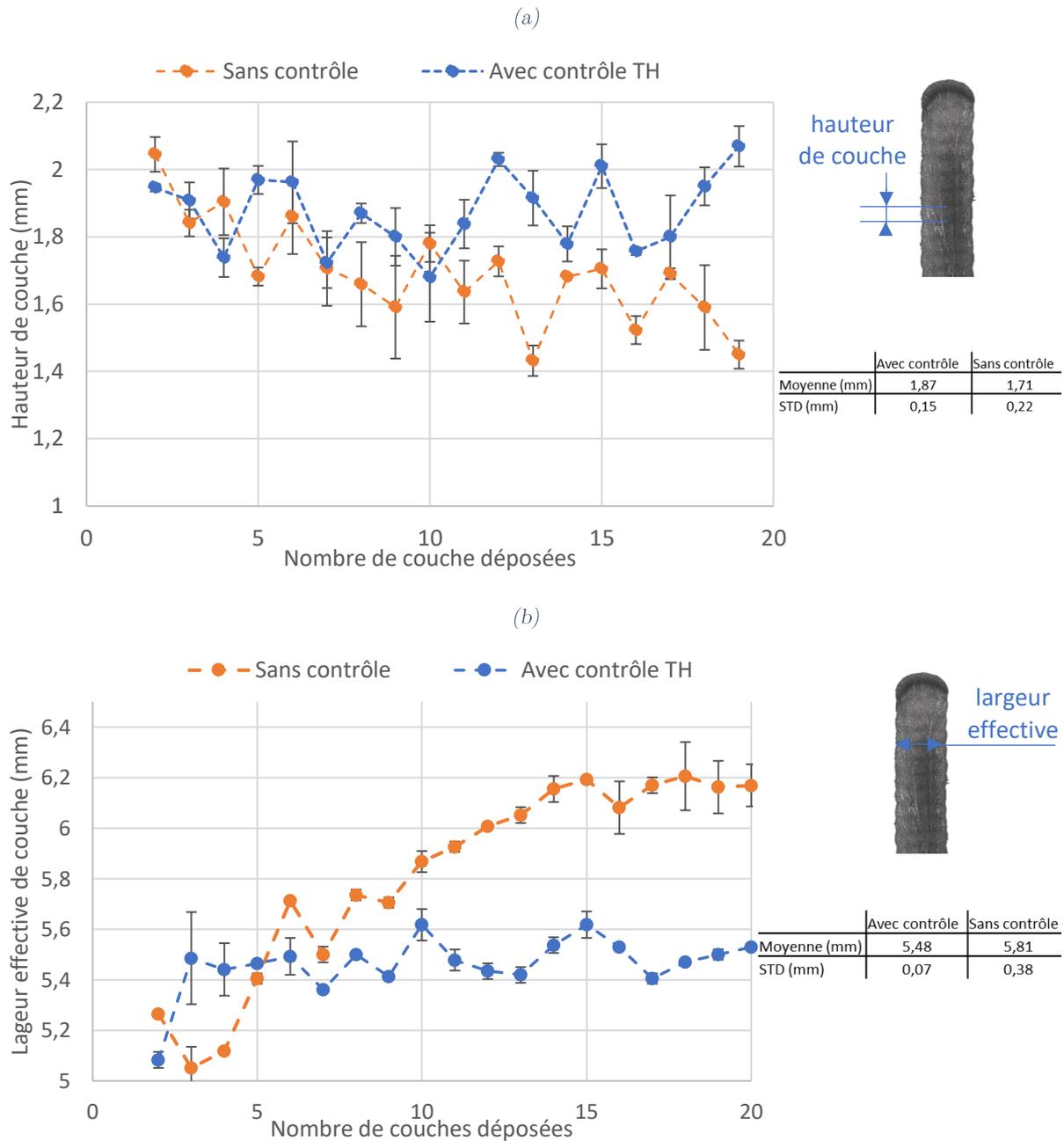


Figure 2-25 : dimensions des couches pour les deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM. (a) Hauteur de couche, (b) Largeur effective de couche.

D'une part, en Figure 2-25.a, nous pouvons observer une diminution de la hauteur de couche le long du mur fabriqué sans contrôle thermique de 2 mm jusqu'à environ 1,6 mm en fin de fabrication. Concernant le mur fabriqué avec contrôle thermique, les hauteurs de couche sont stables aux alentours de 1,87 mm, comme le montre l'écart type correspondant. D'autre part, en Figure 2-25.b, nous pouvons noter une augmentation significative de la largeur effective de couche dans le cas non contrôlé, là où elle se stabilise dès la troisième couche dans le cas contrôlé.

La Figure 2-25 met en évidence les effets des phénomènes thermiques globaux sur la géométrie des couches. Dans le cas du spécimen fabriqué sans contrôle thermique, la chaleur s'accumule progressivement au sein de la pièce, ce qui provoque une modification de la géométrie des cordons et notamment une diminution de la hauteur liée à une augmentation de la largeur. Concernant le spécimen contrôlé, l'adaptation de la temporisation entre couches pour respecter la  $T_{int}$  permet de limiter l'accumulation de chaleur au sein de la pièce et de maintenir une forme de cordon stable, comme le montrent les écarts types.

### Etude des proportions de Ferrite

Des mesures de pourcentage de Ferrite (%Fe) sont réalisées à intervalle de 2 mm le long des deux murs. Les évolutions correspondantes du %Fe sont illustrées en Figure 2-26.

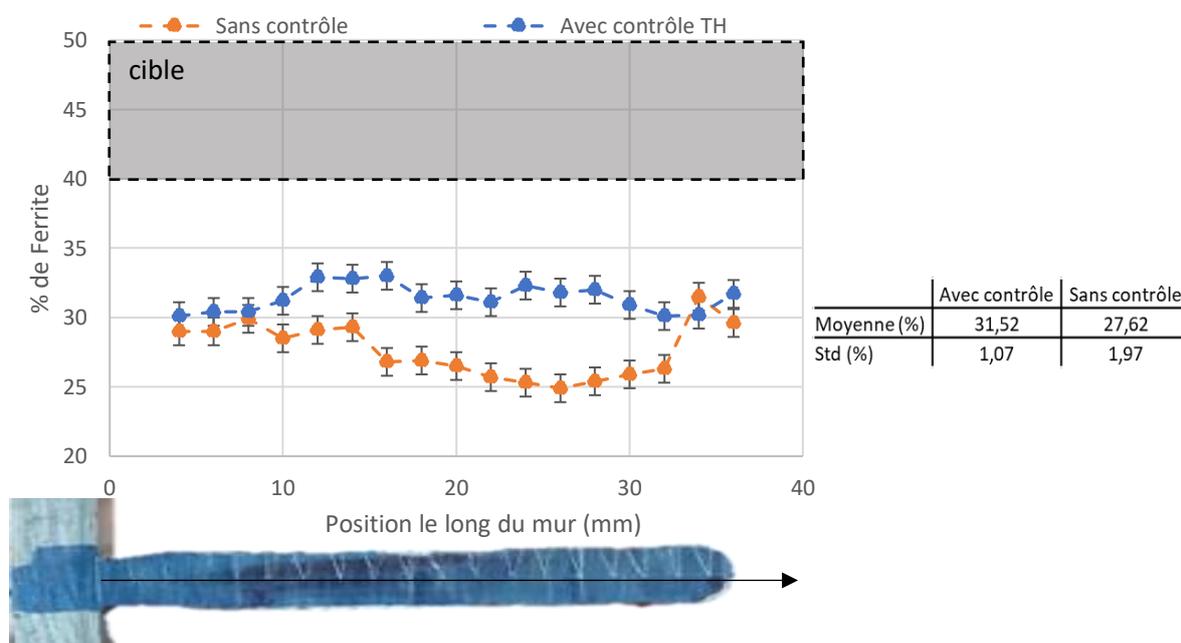


Figure 2-26 : évolution de la proportion de Ferrite le long des deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM.

En Figure 2-26, il convient de noter que les deux murs n'atteignent pas le %Fe visé par le cahier des charges. Cependant, le mur fabriqué avec contrôle thermique présente un %Fe global significativement supérieur et plus stable le long de la ligne de mesure, ce qui est un réel apport. Dans le cas du mur fabriqué avec temporisation constante, on remarque une baisse significative d'environ 5% de Ferrite au milieu du mur. Cette baisse est associée à l'accumulation de chaleur subie par le mur en cours de fabrication, provoquée par la mauvaise gestion des temps de refroidissement entre couches. Ce phénomène s'explique grâce à la considération du diagramme de phase des aciers inoxydables, reporté en Figure 2-27 [Maetz 2014].

Afin de pouvoir estimer les transformations de phase de l'acier Duplex 22 09, nous allons considérer le cas de la nuance commune la plus proche, soit l'acier Duplex 22 05. Le chemin de transformation pour l'acier Duplex 22 05 est illustré en rouge en Figure 2-27 et détaillé ci-après :

Liquide  $\rightarrow$  Liquide + Ferrite  $\rightarrow$  Ferrite  $\rightarrow$  Ferrite + Austénite

La transformation Ferrite – Austénite est favorisée entre 1200°C et 800°C. Dans cette plage de température, une diminution de vitesse de refroidissement du matériau devrait théoriquement aller de pair avec une baisse de la proportion de Ferrite, cette dernière ayant eu le temps de se transformer en Austénite.

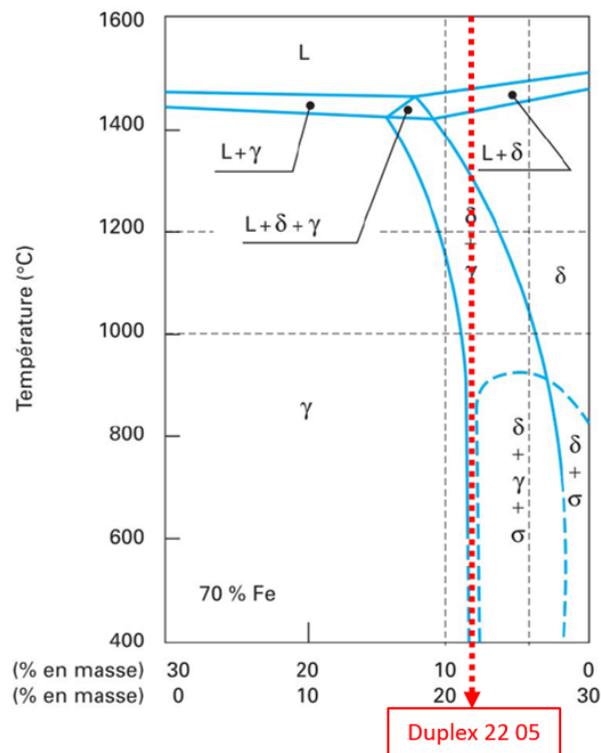


Figure 2-27 : diagramme de phase pseudo-binaire Cr-Ni à l'équilibre, issu d'une coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni à 70% massique de fer [Maetz 2014].

Dans le cas du mur fabriqué sans contrôle thermique, une baisse de la vitesse de refroidissement est attendue dans le dernier segment de couches déposées, à cause de l'augmentation de l'état thermique global et de l'accumulation de chaleur. Une baisse du pourcentage de Ferrite peut donc être anticipée. Pour les dernières couches, l'arrêt des dépôts peut entraîner une ré-augmentation de la vitesse de refroidissement et donc un impact similaire sur la proportion de Ferrite [Petrovič 2011]. En pratique, il est difficile d'illustrer ce raisonnement sur la vitesse de refroidissement à partir des données expérimentales recueillies en temps réel, à cause des cycles thermiques successifs subis par les cordons. Une alternative consiste à considérer le temps de maintien dans la plage de température 800-1200°C [Sieurin 2006].

Dans ces travaux, les temps de maintiens ont été estimés à partir des images thermiques *in-situ*. La Figure 2-28 juxtapose les évolutions de %Fe avec les temps de maintien dans la plage de température 800°C – 1200°C pour les deux murs de l'étude. L'analyse conjointe des Figure 2-28.a et Figure 2-28.b montre que l'évolution du %Fe est effectivement inversement proportionnelle au temps de maintien à haute température. En particulier, la baisse significative de %Fe au milieu du mur non contrôlé correspond à des temps de maintien à haute température supérieurs à 60 s dans la même zone. Au contraire, les temps de maintien restent inférieurs à 30 s avec l'implémentation de la stratégie de contrôle de la température d'interpasse, ce qui peut être relié au %Fe plus élevé et plus stable mesuré le long du mur contrôlé.

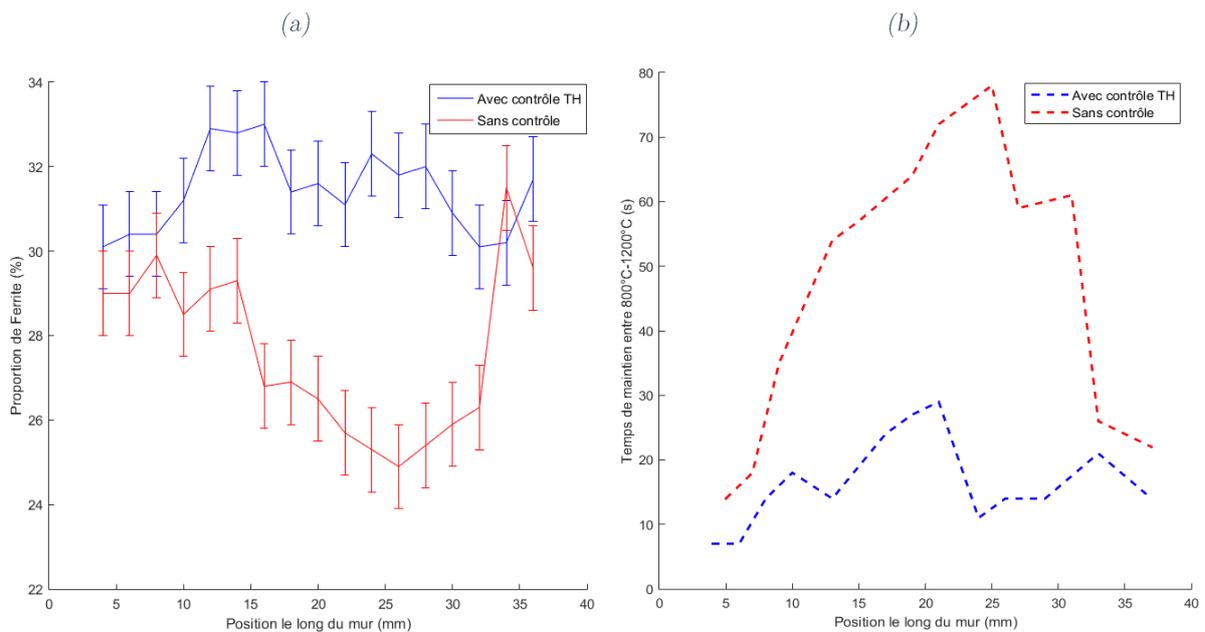


Figure 2-28 : liens entre (a) les évolutions de proportion de Ferrite et (b) les temps de maintien à haute température pour les deux murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermique au procédé WAAM.

L'application d'un contrôle thermique a contribué à augmenter et stabiliser la proportion de Ferrite, ce qui est un réel atout pour maîtriser la microstructure dans les pièces fabriquées avec le procédé WAAM. Pour tendre vers une meilleure composition finale au sens du cahier des charges, il conviendrait d'optimiser d'autres facteurs, tels que la composition initiale du fil ou la nature du gaz [Almeida 2010, Henckell 2017].

## 4. Bilan

Dans cette section, l'implémentation de la boucle de contrôle thermique global développée dans ces travaux a été présentée. Dans le cas des aciers Duplex mis en œuvre avec le procédé WAAM, la stratégie de *monitoring* thermique développée offre plusieurs leviers pour tendre vers les spécifications du cahier des charges. Notamment, cette stratégie permet :

- d'augmenter la proportion de Ferrite et d'améliorer sa stabilité le long du mur ;
- d'améliorer la stabilité géométrique des couches et d'augmenter la hauteur de couche.

## VI. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet du développement d'une stratégie de *monitoring* thermique, identifiée comme premier axe de contrôle dans la méthodologie de *monitoring* multiphysique des procédés DED. Il a été choisi de proposer une boucle de contrôle thermique global basée sur les champs thermiques à la surface de la pièce, afin de pallier les manques relevés dans l'état de l'art et de proposer un moyen de contrôle focalisé sur les champs thermiques à l'échelle de la pièce, complémentaire à la méthode locale de suivi du bain de fusion. Le cas d'application présenté montre que l'implémentation de la stratégie de *monitoring* thermique globale proposée permet d'améliorer la qualité de la pièce, notamment en termes de microstructure et de géométrie. Pour autant, l'impact des corrections thermiques sur la géométrie des pièces ne permet pas d'atteindre la hauteur finale fixée par le cahier des charges. En effet, même si le contrôle thermique permet de stabiliser la géométrie des cordons, il ne permet pas compenser les potentiels défauts de hauteur accumulés en cours de fabrication. Ainsi, le *monitoring* géométrique constitue le deuxième axe de contrôle de la méthodologie de *monitoring* multiphysique et sera abordé dans le chapitre suivant.



# Chapitre 3 : Développements d'une boucle de contrôle géométrique et mise en œuvre d'une stratégie de *monitoring* thermo-géométrique

## I. Introduction

Dans le chapitre précédent, une première boucle de contrôle thermique des procédés DED a été développée et constitue une première avancée vers l'amélioration des pièces fabriquées avec ces technologies. Au vu de l'impact des phénomènes thermiques sur la géométrie de la pièce, nous souhaitons maintenant développer une boucle de contrôle géométrique à mettre en parallèle de la précédente stratégie de *monitoring* thermique, afin d'appréhender ces deux aspects interdépendants de la fabrication et de garantir le respect des dimensions finales souhaitées.

Ce chapitre présente tout d'abord les développements d'une boucle de contrôle géométrique dédiée aux procédés DED. Le but de cette boucle de contrôle est d'assurer que la hauteur de couche déposée correspond à la hauteur de référence fixée en amont de la fabrication, de façon à garantir la croissance de la pièce souhaitée. Dans ces travaux, une attention particulière est portée à la prise de mesure afin d'estimer la hauteur de couche réelle déposée. En fin de chapitre, une nouvelle stratégie de *monitoring* thermo-géométrique, résultante de la mise en parallèle des deux boucles de contrôle, sera appliquée à un cas concret. La présentation des deux boucles de contrôle constituant cette stratégie de *monitoring* thermo-géométrique a fait l'objet d'un article scientifique publié dans le journal *Welding in the World* [Chabot 2019].

## II. Etat de l'art des stratégies de *monitoring* géométrique dédiées aux procédés DED

Pour les procédés DED, le contrôle géométrique est effectué avec des capteurs optiques, principalement des caméras CCD [Fathi 2007, Xiong 2013 & 2014, Shi 2018, Donadello 2019] et des profilmètres laser [Tang 2011, Garmendia 2018, Han 2018]. Ces capteurs sont placés soit fixes dans l'environnement de fabrication [Xiong 2013, Garmendia 2018], soit embarqués sur la tête de dépôt [Fathi 2007, Tang 2011, Heralic 2012, Xiong 2014, Han 2018]. Une comparaison des deux méthodes de mesure principalement mises en œuvre est proposée en Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Comparatif des différentes méthodes de mesures relevées dans la littérature.

Capteur	Avantages	Inconvénients	Montage	Quantité mesurée	Avantages	Inconvénients	Réf	
Profilomètre	- Haute précision - Simplicité mise en œuvre	- Haut coût	Embarqué	SO	- Large champ d'application	- Précision - Beaucoup de données accessibles	- Précision de mesure diminuée par l'organe de déplacement - Capteur souvent déporté par rapport à l'axe de la tête - Mesure en cours de dépôt difficile	Tang 2009 Heralic 2013 Han 2018
				SO h pièce l pièce				- Champ d'application limité - Mesure en cours de dépôt difficile
Caméra CCD	- Bas coût	- Calibration nécessaire - Traitement d'image	Fixe	SO	- Large champ d'application - Mesure en cours de dépôt possible	- Peu de données géométriques accessibles - Filtrage nécessaire	- Champ d'application limité - Filtrage nécessaire	Xiong 2013
				SO h pièce				- Mesure en cours de dépôt possible

Comme il peut être conclu de l'analyse du Tableau 3-1, il n'existe pas de méthode de mesure optimale, permettant à la fois d'effectuer une mesure précise en temps réel et d'accéder à l'ensemble des caractéristiques géométriques de la pièce. La caméra CCD semble être la solution la plus privilégiée pour des raisons économiques, mais l'intégration de cette dernière dans l'environnement de fabrication nécessite des méthodes de filtrage et de traitement d'image [Xiong 2014]. Malgré son coût, la solution de profilomètre laser est choisie pour son implémentation simple et sa meilleure précision de mesure. Cependant, une mesure en temps réel avec ce type de capteur est difficile à mettre en œuvre, du fait de perturbations de mesures liées à la source de chaleur [Heralić 2012]. Il convient également de discuter les différences de performances des deux types de capteurs en termes de précision : les précisions de mesure sont de l'ordre de 0,5 mm avec une CCD [Xiong 2014], là où un profilomètre laser permet de descendre en dessous de 0,1 mm [Garmendia 2018, Han 2018]. Indépendamment du type de capteur utilisé, un montage embarqué derrière la tête de dépôt est privilégié car permettant de suivre les trajectoires et ainsi de s'affranchir de la géométrie et de la taille de la pièce pour la mesure. Récemment, de nouvelles méthodes de mesure sont investiguées pour permettre une mesure en temps réel tout en garantissant une haute précision de mesure. Kissinger propose un nouveau capteur optique basé sur la technique d'interférométrie, qui, monté coaxial à la torche, permet d'acquérir la hauteur de la pièce, avec de perspectives prometteuses pour une implémentation en temps réel [Kissinger 2019].

A partir de ces méthodes de mesure, deux stratégies de contrôle de la géométrie des pièces fabriquées en DED sont communément choisies dans la littérature. Ces deux stratégies de contrôle sont illustrées en Figure 3-1. La majorité des études proposent une stratégie de contrôle géométrique en cours de dépôt, afin de garantir la stabilité de hauteur au sein d'une couche [Xiong 2013 & 2014, Han 2018, Donadello 2019]. Le contrôle géométrique peut également être mené à l'échelle de la pièce, afin d'assurer une géométrie de cordon constante couche après couche, vers le respect des dimensions fixées par le cahier des charges en fin de fabrication [Tang 2011, Heralić 2012, Xiong 2014, Garmendia 2018]. Quelle que soit l'échelle considérée, le contrôle géométrique peut être mené à partir de plusieurs grandeurs physiques d'intérêt : le *Stick Out*, la hauteur ou la largeur de cordon. Différentes méthodes de mesure ont été proposées pour les procédés LMD [Fathi 2007, Shi 2018, Donadello 2019] et WAAM [Xiong 2013 & 2014, Han 2018]. Dans l'optique d'améliorer les performances de la boucle de contrôle, une attention particulière peut être portée sur les modèles de contrôle [Haley 2019, Woo 2019, Gonçalves 2019]. La suite de l'état de l'art va maintenant détailler les différentes méthodes de mesure identifiées.

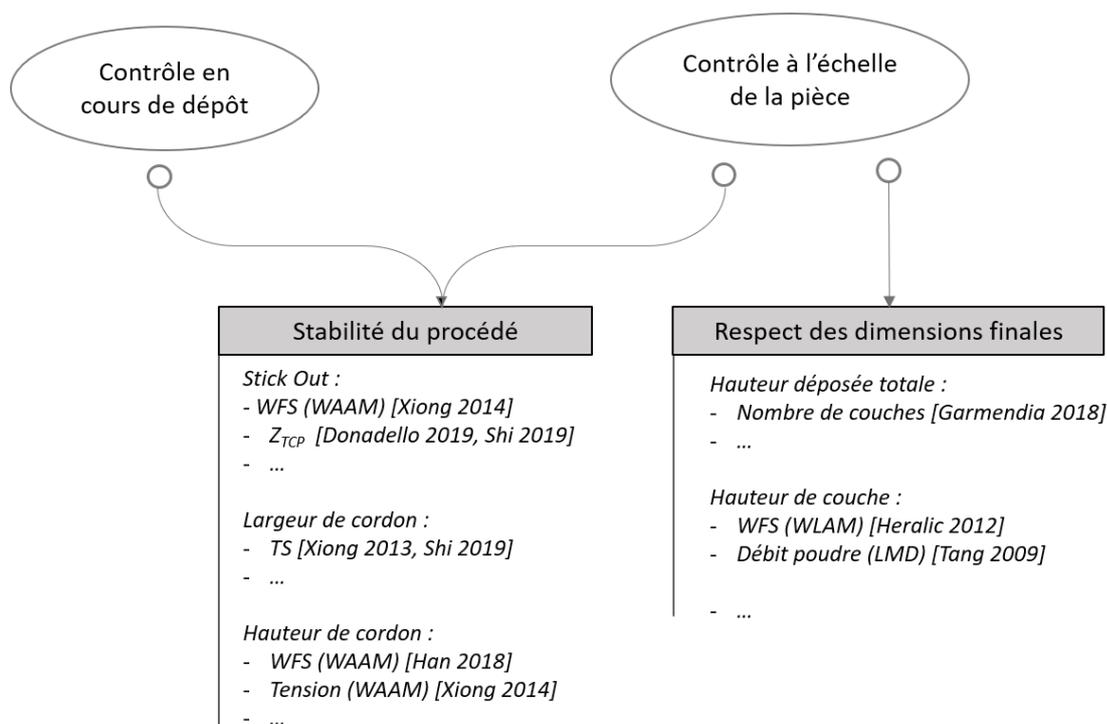


Figure 3-1 : schéma résumant les deux approches de monitoring géométrique existantes pour les procédés DED.

Pour le procédé LMD, Donadello *et al.* proposent d'ajuster la position de la tête de dépôt en temps réel pour garantir un SO constant. Le SO réel est estimé via triangulation, en mesurant avec une caméra CCD embarquée la taille d'un point laser réfléchi sur le cordon en cours de dépôt [Donadello 2019]. La validation de la méthode est conduite sur un cylindre monocordon avec une trajectoire hélicoïdale. Fathi *et al.* choisissent de corriger la vitesse d'avance en cours de dépôt pour satisfaire une consigne de hauteur de couche à l'aide d'un modèle de correction non-linéaire et d'un régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivation (PID) à avance de phase [Fathi 2007]. La méthode de contrôle est illustrée avec succès sur un mur monocordon à surface complexe. De la même manière, la vitesse d'avance est choisie par Shi *et al.* comme paramètre à ajuster pour contrôler la largeur de cordon, cette fois via un contrôleur Proportionnel-Intégral [Shi 2018]. Par ailleurs, des ajustements de la position de la tête de dépôt sont également menés en temps réel afin de garantir un SO constant malgré les corrections de vitesse mises en œuvre [Shi 2018]. Concernant le procédé WAAM, Xiong *et al.* ont développé plusieurs stratégies de *monitoring* géométrique, basées sur différentes quantités physiques mentionnées en Figure 3-1 [Xiong 2013 & 2014]. Une première boucle de contrôle vise à maintenir une largeur de cordon constante au sein d'une couche. La vitesse d'avance est à nouveau sélectionnée comme paramètre à corriger en sortie d'un contrôleur à auto-apprentissage. Cette stratégie est principalement destinée à des structures multicordons [Xiong 2013]. Par la suite, Xiong *et al.* proposent une autre stratégie visant à garder un SO constant en cours de dépôt. Cette fois, la vitesse de dévidage du fil est sélectionnée comme paramètre de sortie d'un régulateur PID. En outre, un ajustement de l'incrément vertical est mené d'une couche à l'autre en fonction de la valeur moyenne du *Stick Out* mesuré

à la couche précédente [Xiong 2014]. Plus récemment, Han *et al.* présentent une stratégie de *monitoring* complète, double-entrée double-sortie, afin de contrôler simultanément la hauteur et la largeur de couche en cours de dépôt [Han 2018]. Malgré l'interdépendance des deux caractéristiques géométriques considérées, deux boucles de contrôle sont mises en œuvre séparément. La vitesse d'avance est corrigée à l'aide d'un régulateur PI pour contrôler la largeur et des corrections incrémentales de la tension d'arc sont utilisées pour contrôler la hauteur de cordon [Han 2018].

Concernant les stratégies de *monitoring* mises en œuvre à l'échelle de la pièce, les études concernent les procédés LMD [Tang 2011, Garmendia 2018] et WLAM [Heralić 2012]. Pour le procédé WLAM, Heralić présente les développements d'un *Iterative Learning Controller* permettant d'adapter la quantité de matière déposée d'une couche en fonction des déviations de hauteur des deux précédentes [Heralić 2012]. Pour cela, la consigne de vitesse de dévidage du fil est corrigée en prenant en compte les défauts de hauteur moyens accumulés aux deux couches précédentes. En outre, la hauteur du robot est également réajustée entre chaque couche, pour garantir un SO constant tout au long de la fabrication [Heralić 2012]. Pour le procédé LMD, il convient de mentionner la publication de Tang *et al.*, qui est, à notre connaissance, l'unique étude proposant une correction du débit de poudre à des fins de contrôle géométrique [Tang 2011]. Plus récemment, Garmendia *et al.* proposent une stratégie de contrôle qui se démarque des autres stratégies précédemment évoquées, tant du point de vue de la méthode de mesure que de la stratégie de correction. D'une part, la boucle de contrôle est basée sur la hauteur déposée à l'échelle d'un tronçon de plusieurs couches et non sur une mesure de la hauteur de couche [Garmendia 2018]. En sortie de la boucle de contrôle, Garmendia n'agit pas sur les paramètres opératoires mais ajoute ou supprime des couches pour le tronçon suivant, de façon à compenser l'écart mesuré entre la hauteur déposée et la hauteur souhaitée [Garmendia 2018]. Cette stratégie de contrôle est pertinente puisqu'elle n'est pas intrusive et permet de conserver un régime permanent de dépôt. Cependant, elle nécessite la possibilité de modifier les trajectoires en cours de fabrication, aux moyens de commande numérique et de logiciel CAO adaptés, ce qui n'est pas toujours le cas. D'autre part, cette stratégie de correction ne semble pas adaptée pour des géométries complexes, où le nombre de couches ainsi que les trajectoires sont optimisées pour réaliser la géométrie d'intérêt. Ainsi, dans la mesure du possible, il apparaît pertinent de ne pas modifier les trajectoires et d'ajuster les paramètres opératoires afin de garantir que la bonne quantité de matière est déposée à chaque couche et que les dimensions des cordons sont conformes à celles établies en amont de la fabrication.

De manière générale, il convient de rappeler qu'un contrôle géométrique des procédés est avant tout mené pour améliorer leurs performances et assurer le respect des dimensions fixées par le cahier des charges. En ce sens, l'état de l'art précédent a montré que plusieurs stratégies de contrôle pertinentes existaient déjà dans la littérature. Il convient de remarquer que la plupart des papiers proposant une stratégie de *monitoring* géométrique oriente leur contribution sur le développement du contrôleur, sans discuter la pertinence de la méthode de mesure ni la précision de la quantité physique considérée en entrée. Cependant, il est important de noter que la hauteur d'une couche subit une variation en cours de dépôt, ce qui complexifie la mise en œuvre d'un contrôle géométrique. En effet, comme illustré en Figure 3-2, le dépôt des couches suivantes entraîne une diminution de hauteur, à cause d'une refusion du haut de la couche avec la suivante. Ainsi, pour la couche p illustrée en Figure 3-2, l'évolution de hauteur de couche entre sa phase de dépôt et le dépôt des couches suivantes peut être modélisée de la façon suivante :

$$h_{\text{instantanée}} = h_{\text{réelle}} + \varepsilon \quad \text{Equation 3-1}$$

Avec  $h_{\text{instantanée}}$  hauteur de couche p juste après dépôt,  
 $h_{\text{réelle}}$  hauteur de couche p après dépôt des couches suivantes,  
 $\varepsilon$  retrait dû au dépôt des couches suivantes.

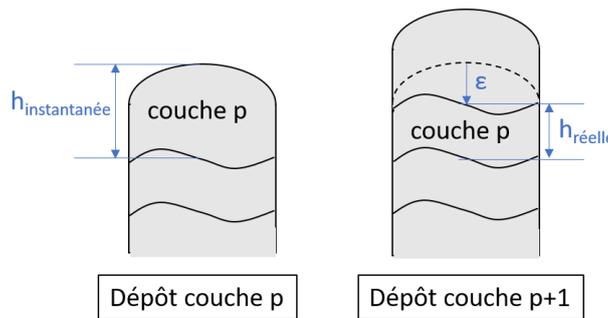
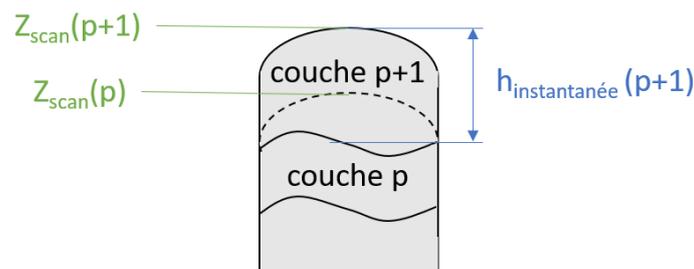


Figure 3-2 : variations de hauteur d'une couche p en cours de fabrication.

La majorité des stratégies des *monitoring* géométrique proposées dans la littérature basent leur boucle de contrôle sur la hauteur de couche  $h_{\text{instantanée}}$ . La considération de cette quantité physique en entrée nécessite d'adapter la hauteur consigne à implémenter dans le contrôleur, de façon à prendre en compte le retrait et à garantir une hauteur réelle conforme au modèle géométrique après refusion. Cependant, il paraît difficile de modéliser le retrait lié au dépôt des couches suivantes, car ce dernier est fonction de l'accumulation de chaleur, de la géométrie de la pièce et des paramètres opératoires. Ainsi, la considération de la hauteur de couche instantanée en entrée de la stratégie de *monitoring* géométrique peut induire la mise en œuvre de corrections imprécises et donner lieu à des géométries finales incorrectes, malgré le contrôle en temps réel.

Par ailleurs, il convient de discuter la prise de mesure et le descripteur géométrique communément employée dans la littérature. La hauteur de couche est principalement calculée par différence entre la hauteur mesurée à la dernière couche déposée – soit en temps réel ou à l'issue du dépôt – et la hauteur de la couche précédente. Or, comme pointé par Garmendia, cette méthode de mesure donne lieu à de nouvelles imprécisions pour le contrôle [Garmendia 2018]. En effet, comme illustré en Figure 3-3, la hauteur mesurée à la couche  $p$ , servant de référence pour le calcul de hauteur de couche au niveau  $p+1$ , ne correspond plus à la position de la couche  $p$  au moment du dépôt de la couche  $p+1$  à cause du retrait précédemment évoqué. Ainsi, le descripteur géométrique résultant ne correspond ni à la hauteur de couche instantanée ni à la hauteur de couche réelle, ce qui peut dégrader la pertinence des corrections mises en œuvre dans le processus de contrôle.



$$h_{\text{mesurée}}(p+1) = Z_{\text{scan}}(p+1) - Z_{\text{scan}}(p)$$

$$h_{\text{mesurée}}(p+1) \neq h_{\text{instantanée}}(p+1)$$

Figure 3-3 : illustration des variations hauteurs de couche en cours de fabrication.

Au vu de l'état de l'art et des éléments discutés précédemment, nous identifions plusieurs verrous à lever dans le développement d'une stratégie de *monitoring* géométrique :

- la difficulté de mesurer la hauteur de couche réelle de manière fiable en cours de procédé .
- la difficulté de mettre en œuvre des corrections assurant le respect des dimensions finales.

### III. Développement d'une méthode de mesure géométrique

#### 1. Objectifs

Prenant en considération les verrous relevés dans la littérature, les axes de travail poursuivis dans cette section sont les suivants :

- l'adaptation de la méthode de mesure pour accéder à un descripteur géométrique au plus proche de la hauteur de couche réelle ;
- le développement d'une stratégie de *monitoring* géométrique pouvant être mise en œuvre simultanément avec le contrôle thermique développé au chapitre précédent ;

## 2. Montages expérimentaux et post-traitement des données

Dans le cadre de ces travaux, un profilomètre laser 2D a été sélectionné pour mener les développements d'une stratégie de *monitoring* géométrique pour les procédés DED, principalement pour sa facilité de mise en œuvre et la précision des mesures compatibles avec les deux échelles des procédés d'intérêt LMD et WAAM. Le profilomètre choisi est un profilomètre laser de longueur d'onde 405 nm. A la distance de travail de  $200^{\pm 50}$  mm, la longueur de la nappe est approximativement de 80 mm, avec 800 points de mesure. La précision de mesure dans l'axe Z est de 1  $\mu$ m et 60  $\mu$ m le long de la nappe.

Les montages expérimentaux de mesure géométrique pour les procédés LMD et WAAM sont illustrés en Figure 3-4 et Figure 2-2 respectivement. Il est choisi de monter le profilomètre sur la tête de dépôt afin de garantir l'applicabilité de la stratégie de *monitoring* sur un large panel de cas d'application. Ainsi, pour les deux procédés, le profilomètre laser est monté derrière la tête de dépôt, à 200 mm de la pièce. Dans le cas du procédé WAAM, une plaque de protection est ajoutée au montage afin d'éviter les dégradations du capteur par d'éventuelles projections. Dans le développement de notre méthode de mesure géométrique, la vitesse de déplacement du capteur le long de la pièce est un paramètre à considérer pour maîtriser la distance d'échantillonnage et le temps de prise de mesure. Ces deux paramètres sont eux-mêmes dépendants de la géométrie du spécimen à mesurer. Dans ces travaux, la vitesse de déplacement du capteur dans les phases de mesure est fixée à 200 mm/min pour le WAAM, ce qui implique une résolution spatiale de 0,2 mm. Cette résolution permet de capter les variations de hauteur locales qui génèreront une déviation de hauteur à l'échelle de la pièce et pourront être corrigées avec la stratégie de *monitoring* développée.



Figure 3-4 : montage expérimental pour le *monitoring* géométrique appliqué au procédé LMD.

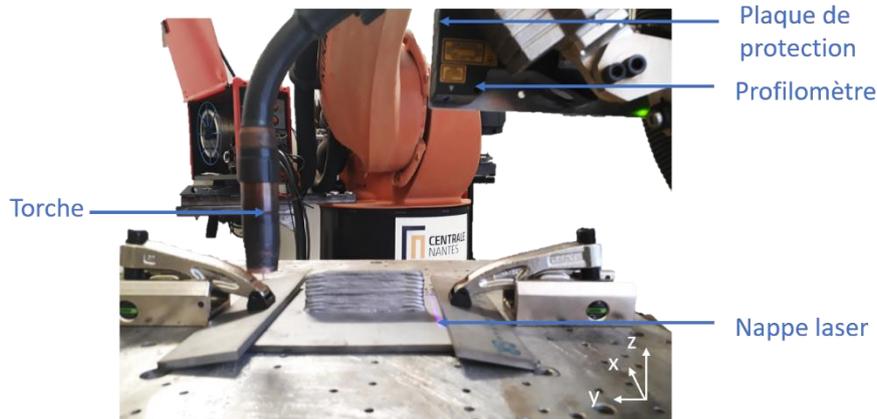


Figure 3-5 : montage expérimental pour le monitoring thermique appliqué au procédé WAAM.

Avec le montage développé, des tests de mesure en cours de dépôt ont montré que les scans n'étaient pas exploitables, car perturbés par des réflexions des rayons du laser sur le cordon encore chaud. Ainsi, dans ces travaux, les mesures géométriques sont réalisées entre les phases de dépôt, avec le principe de mesure détaillé en Figure 3-6.

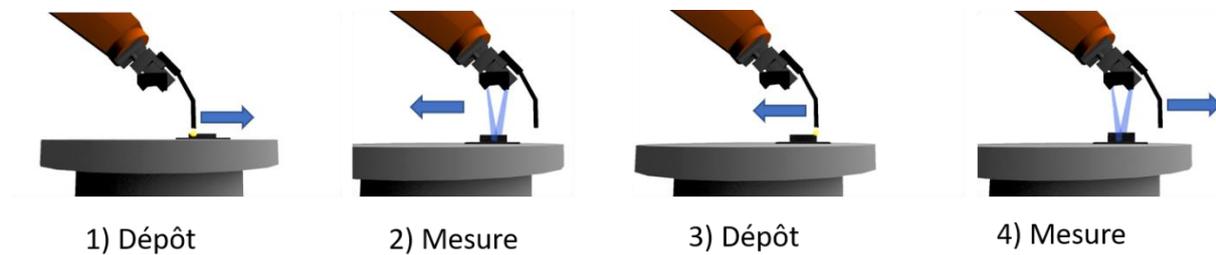


Figure 3-6 : principe de prise de mesure géométrique.

Les scans sont réalisés avec un logiciel développé au laboratoire et le traitement des données est mené avec MATLAB®. Un programme développé pour les besoins de la thèse rassemble les données sous forme de matrice de dimension 2, contenant les 800 points de mesure pour chaque position le long de la pièce scannée. Dans le cadre du contrôle en temps réel, un profil 2D est extrait des données mesurées pour calculer la hauteur de la pièce. Un exemple de profil est illustré en Figure 3-7 pour le cas d'un mur monocordon. Plusieurs étapes de réduction de données sont conduites afin d'obtenir la hauteur du spécimen. Dans un premier temps, les variations du gradient  $\frac{dz}{dx}$  sont considérées pour détecter les bords de la pièce et éventuellement enlever les données relatives au substrat. Dans un deuxième temps, les extrémités de la pièce peuvent être également retirées de la zone d'intérêt, à cause de potentielles variations géométriques dues aux arrêts et départs des dépôts. En Figure 3-7, pour le cas d'un mur monocordon, le profil considéré pour le calcul de hauteur de couche est illustré en orange, superposé au profil du mur entier.

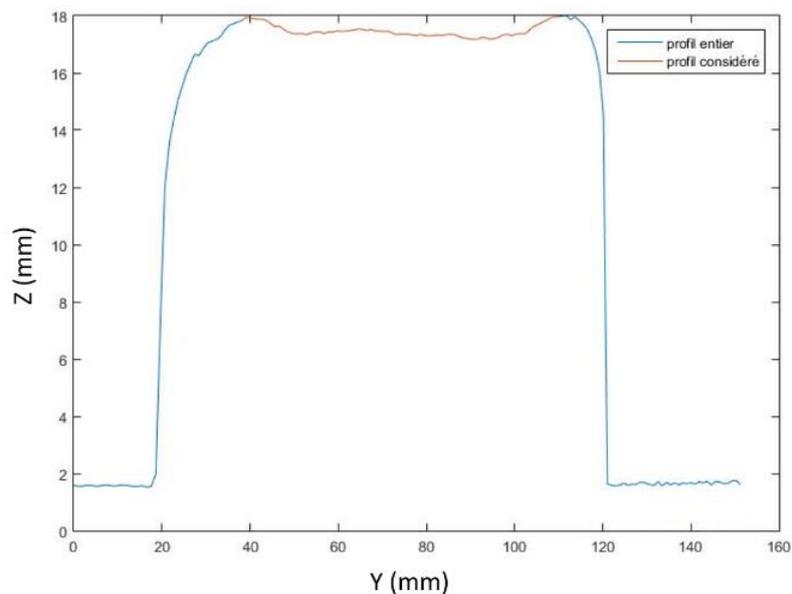


Figure 3-7 : exemple de données géométriques issues de scan in-situ d'un mur monocordon WAAM : profil 2D avec les valeurs maximales calculées le long de l'axe X.

Parallèlement à l'obtention de la hauteur du haut du mur à partir des données mesurées, il est nécessaire de calculer la position du substrat afin de calculer la hauteur du mur par différence. Pour cela, deux méthodes de post-traitement sont proposées et schématisées en Figure 3-8.

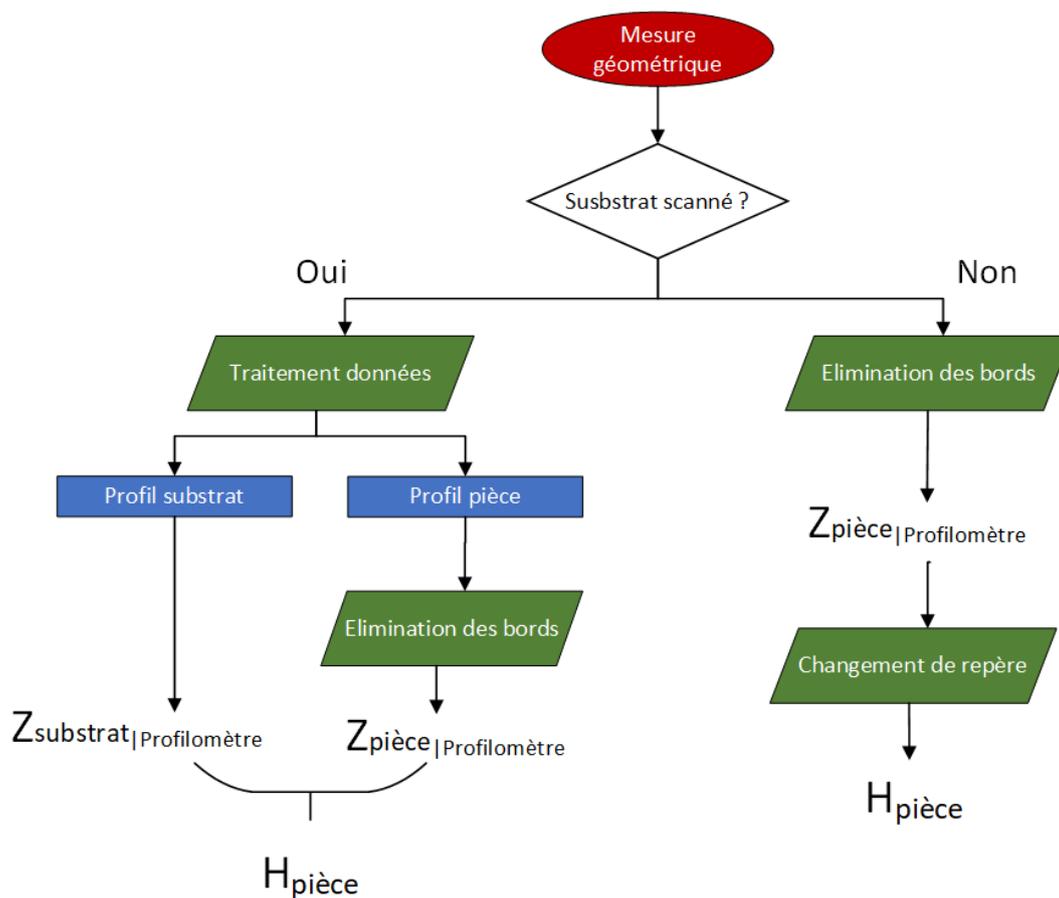


Figure 3-8 : traitement des données pour obtenir la hauteur de la pièce à partir de la mesure géométrique.

Dans le cas où la hauteur de la pièce est inférieure à l'intervalle de mesure du capteur, c'est-à-dire pour des hauteurs inférieures à 50 mm, le substrat est capté dans la mesure. Ainsi, la hauteur de la pièce peut être calculée directement à partir des mesures. Dans le cas où la pièce sort de l'intervalle de mesure du capteur, seul le haut du mur est scanné et. Un changement d'origine de la mesure doit donc être opéré, depuis l'origine du capteur vers l'origine du robot, dans lequel la position du substrat est connue. A partir des données illustrées en Figure 3-9, la démarche de changement d'origine est détaillée. Notons  $z_{mesure}$  la position du haut du mur par rapport à l'origine du capteur et  $Z_{MES}$  par rapport à l'origine du robot. La distance entre le haut du mur et le capteur est connue et égale à :

$$Dist_{pièce-profilo} = Dist_{travail} - z_{mesure} \quad \text{Equation 3-2}$$

On en déduit la distance entre la pièce et le *Tool Center Point* (TCP), point piloté par la CN :

$$Dist_{pièce-TCP} = Dist_{travail} - z_{mesure} - Dist_{profilo-TCP} \quad \text{Equation 3-3}$$

Or, dans le repère du robot, la distance entre la pièce et le TCP s'écrit également :

$$Dist_{pièce-TCP} = Z_{TCP} - Z_{MES} \quad \text{Equation 3-4}$$

En injectant l'Equation 3-4 dans l'Equation 3-3, on obtient la formule de changement d'origine :

$$Z_{MES} = z_{mesure} + Dist_{profilo-TCP} - Dist_{travail} - Z_{TCP} \quad \text{Equation 3-5}$$

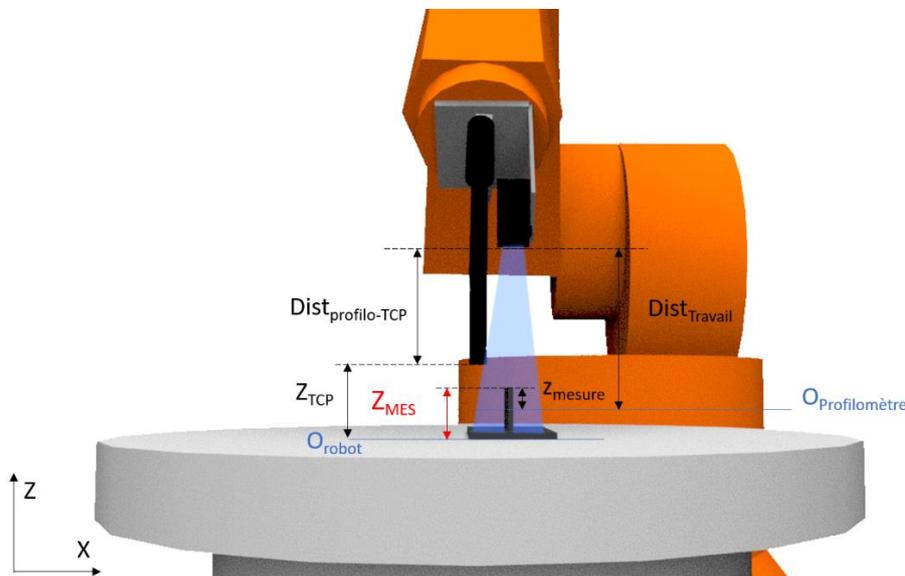


Figure 3-9 : changement d'origine de la mesure pour obtenir la hauteur de la pièce dans le cas d'un substrat hors zone de mesure du capteur.

### 3. Qualification de la mesure

Dans cette section, nous souhaitons évaluer la justesse et la répétabilité de mesure du montage expérimental, comprenant le profilomètre et le bras du robot. Les travaux de qualification de la mesure sont menés sur un mur monocordon de 20 couches de 100 mm de long, fabriqué par le procédé WAAM sur une plaque carrée de 150 mm de côté et 5 mm d'épaisseur. Le spécimen est illustré en Figure 3-10.



Figure 3-10 : spécimen sélectionné pour l'étude de justesse de la mesure géométrique.

Dans cette étude, la répétabilité de la mesure est évaluée avec quatre séries de 5 scans du mur en fin de fabrication. Parmi ces quatre séries, trois séries sont réalisées à la suite et une quatrième après démontage du capteur, afin d'évaluer la répétabilité indirecte de la mesure. Concernant l'étude de justesse de la mesure géométrique, les mesures du profilomètre laser sont comparées à des mesures de référence obtenues avec un scanner laser 3D. Les différentes séries de mesure sont présentées en Figure 3-11.

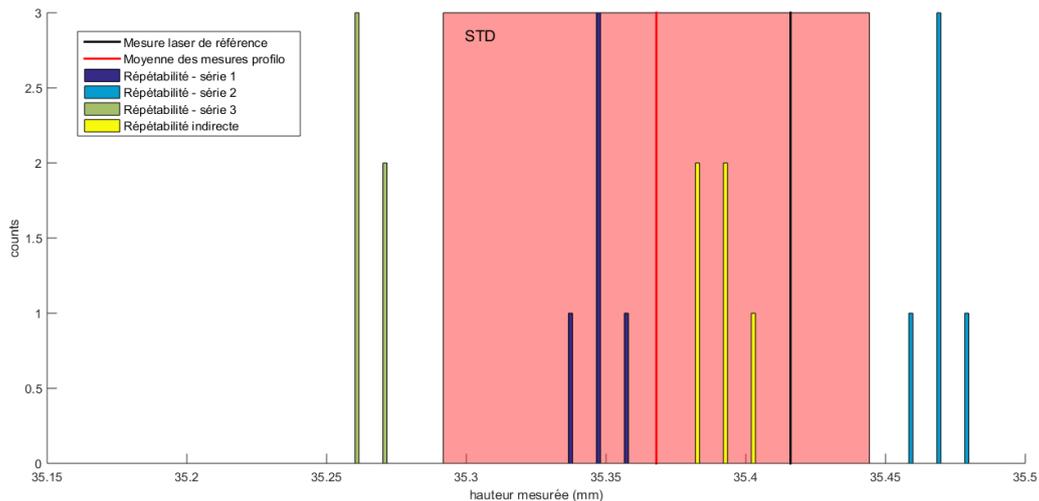


Figure 3-11 : résultats de l'étude de répétabilité et de justesse de la mesure géométrique.

En Figure 3-11, les mesures issues des quatre séries de scan sont tracées sous formes d'histogramme. La moyenne des quatre séries est tracée en rouge à 35,36 mm. La hauteur de référence, obtenue via scanner 3D, est égale à 35,41 mm et est illustrée en noir en Figure 3-11. Au sein d'une même série, nous pouvons constater que l'écart moyen entre les 5 scans est de l'ordre 0,01 mm. La dispersion des mesures à l'échelle de l'ensemble des séries, évaluée par l'écart type, est de l'ordre de 0,1 mm. Finalement, l'écart des moyennes des quatre séries de mesure avec la stratégie proposée par rapport à la valeur de référence est d'environ 0,07 mm.

Les performances de mesure précédemment évaluées sont de l'ordre des incertitudes du procédé WAAM mis en œuvre au laboratoire. Cette étude valide donc la pertinence de notre méthode de mesure pour ce procédé. Concernant le LMD, il serait nécessaire de reprendre ce protocole afin de qualifier la précision de la méthode de mesure avec le montage expérimental propre à la machine et de valider que la précision de la méthode de mesure est compatible avec les tolérances géométriques associées au procédé.

## IV. Développement d'une boucle de contrôle géométrique

### 1. Approche de *monitoring* géométrique

L'approche de *monitoring* géométrique proposée dans ces travaux est illustrée en Figure 3-12. Dans cette approche, la mesure géométrique est réalisée entre les phases de dépôt avec un capteur embarqué sur la tête de dépôt. Les quantités physiques d'intérêt sont extraites du scan 3D de la pièce. Si nécessaire, les paramètres opératoires sont modifiés pour les couches suivantes afin de garantir le dépôt de cordons aux dimensions souhaitées.

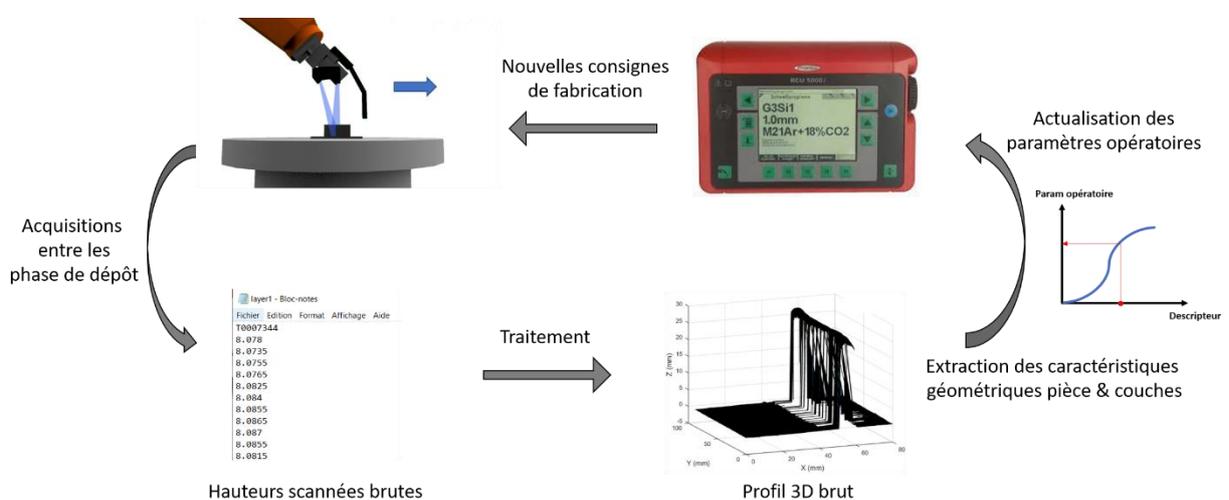


Figure 3-12 : approche de monitoring géométrique proposée dans ces travaux.

## 2. Proposition d'une boucle de contrôle géométrique

Dans ces travaux, nous proposons de considérer une information de hauteur de couche moyenne, calculée sur un tronçon constitué de plusieurs couches, comme dans les travaux de Garmendia [Garmendia 2018]. Le nombre de couches entre chaque scan, appelé  $n_{scan}$ , est un paramètre majeur à déterminer pour la mise en œuvre de cette stratégie de *monitoring*. En ce sens, il convient de remarquer que plus  $n_{scan}$  est grand, plus la valeur de la hauteur de couche moyenne va être représentative de la hauteur de couche vraie. L'augmentation de  $n_{scan}$  va également de pair avec une optimisation du temps de fabrication total, puisque réduisant les étapes de contrôle. Cependant, le choix d'un  $n_{scan}$  important augmente le risque d'accumuler des défauts de hauteur couche après couche, résultant en une déviation par rapport à la hauteur théorique significative et difficile à corriger par la suite. A l'inverse, le choix d'un  $n_{scan}$  trop faible risque d'impacter la validité de la hauteur moyenne comme descripteur de la hauteur de couche réelle. Le nombre total de couches prévu pour fabriquer la pièce peut également intervenir dans le choix de la fréquence de contrôle.

Il convient maintenant de discuter le choix du paramètre opératoire à corriger en sortie de la boucle de contrôle. A travers l'état de l'art, nous avons pu remarquer que WFS et TS sont les deux paramètres opératoires majoritairement sélectionnés. Dans ces travaux, il peut ne pas être pertinent de choisir une correction basée sur WFS, puisque le paramètre opératoire équivalent dans la technologie LMD est le débit de poudre, difficilement maîtrisable à des fins de contrôle en temps réel [Tang 2011]. A l'inverse, TS est un paramètre commun à l'ensemble des procédés DED, souvent facilement accessible depuis la commande numérique de la machine ou cellule robotisée. Par ailleurs, dans l'optique de nos développements de *monitoring* multiphysique, il est nécessaire de choisir le paramètre le moins intrusif à la stabilité du procédé, la cinétique thermique globale et locale, ainsi que le transfert de matière au niveau du bain de fusion. Cependant, il convient de mentionner que ce paramètre n'est pas le plus influant sur la hauteur de couche et impacte également de manière critique la largeur de couche [Xiong 2018, Woo 2019]. Dans ces travaux, nous choisissons en première approche de proposer une correction basée uniquement sur TS. En perspective de ces travaux, il est souhaité mettre en œuvre une correction couplée de WFS et TS, afin de conserver une quantité de matière déposée constante malgré les corrections de géométrie [Xiong 2018].

A partir des discussions précédemment menées, la boucle de contrôle géométrique proposée est détaillée en Tableau 3-2. Dans cette boucle, la hauteur de couche moyenne est mesurée et comparée à la hauteur de couche de référence, définie en amont de la fabrication lors de l'étape de tranchage du modèle géométrique. La vitesse d'avance est sélectionnée comme paramètre opératoire à corriger, afin d'ajuster la quantité de matière à déposer aux tronçons suivants pour compenser les dérives accumulées.

Tableau 3-2 : boucle de contrôle géométrique développée dans ces travaux.

<b>Descripteur mesuré en entrée</b>	Hauteur de couche moyenne déposée sur un tronçon
<b>Quantité physique associée au descripteur</b>	Hauteur de couche réelle (à l'état refusionné)
<b>Paramètre opératoire corrigé en sortie</b>	TS
<b>Seuil de contrôle</b>	Hauteur de couche de référence définie dans le modèle géométrique

### 3. Evolution de la hauteur de couche moyenne en fonction de TS

Afin de mettre en œuvre la boucle de contrôle géométrique proposée précédemment, il est nécessaire de déterminer le lien entre TS et la hauteur de couche moyenne, notée  $h_{C_{moy}}$ . Cette étude a été menée pour des géométries monocordons fabriquées en acier duplex avec le procédé WAAM.

Dans ces travaux, l'impact de TS sur  $h_{C_{moy}}$  est évalué à partir de cinq murs monocordons de 20 couches en acier inoxydable duplex. Ces murs ont été fabriqués à paramètres opératoires constants. Une vitesse de dévidage de fil de 7,4 m/min et une puissance de 3460 W sont utilisées. Par ailleurs, chaque mur a été fabriqué avec une vitesse d'avance différente, allant de 500 mm/min à 1300 mm/min, conformément aux préconisations du fournisseur du poste de soudage pour déposer le matériau d'intérêt. Par ailleurs, les murs sont fabriqués avec la boucle de contrôle thermique implémentée, afin de construire un abaque dans des conditions conformes à la stratégie de *monitoring* thermo-géométrique visée. Pour chaque mur,  $h_{C_{moy}}$  est calculée en divisant la hauteur finale du mur par le nombre de couches. L'abaque reliant TS à  $h_{C_{moy}}$  est illustré en Figure 3-13 et le modèle utilisé pour décrire l'évolution TS en fonction de  $h_{C_{moy}}$  est reporté dans l'Equation 3-6.

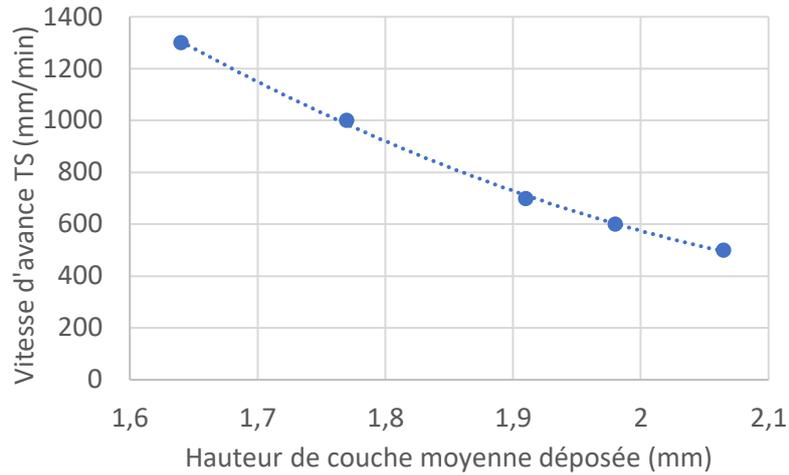


Figure 3-13 : abaque de choix de TS en fonction de la hauteur de couche moyenne.

$$TS = 1884,5 * h_{Cmoy}^2 - 8888,9 * h_{Cmoy} + 10815 \quad \text{Equation 3-6}$$

Afin de limiter l'impact de la correction choisie sur la largeur de couche, nous souhaitons étudier le lien entre TS sur la largeur de couche. L'évolution de la largeur de couche en fonction de TS est illustrée en Figure 3-14. De manière évidente, la largeur de couche augmente avec la diminution de TS. En particulier, nous pouvons remarquer qu'une correction de 200 mm/min entraîne une variation de 15 % de la largeur de couche dans la plage de vitesse d'avance considérée. Ces éléments serviront de base à l'élaboration de la stratégie de correction de la vitesse d'avance à mettre en œuvre en cours de procédé qui sera détaillée dans la Section V.2.4.

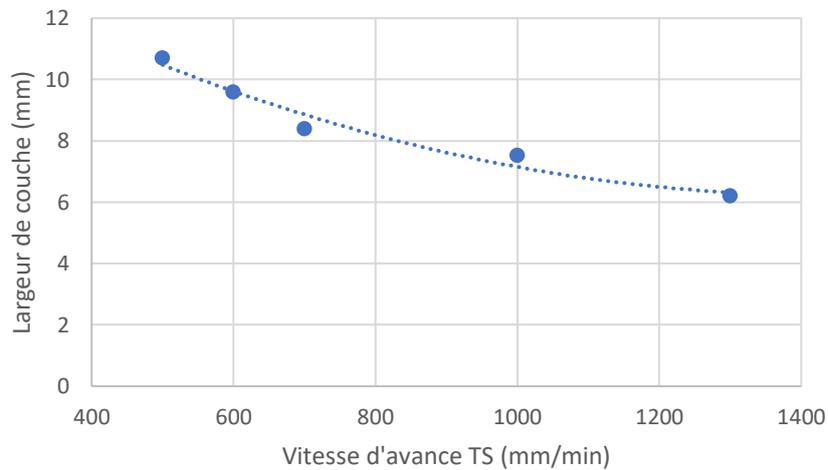


Figure 3-14 : Variation de largeur de couche en fonction de la vitesse d'avance.

### 3. Bilan

Dans cette section, une boucle de contrôle géométrique a été développée sur le procédé WAAM. De manière complémentaire aux stratégies relevées la littérature basées sur une mesure de hauteur de couche instantanée, la boucle de contrôle proposée considère d'une hauteur de couche moyenne, proche de la hauteur réelle obtenue après refusion. La considération de ce descripteur géométrique permet d'améliorer la pertinence des corrections mises en œuvre et de garantir une hauteur finale de la pièce conforme au cahier des charges.

Par ailleurs, la boucle de contrôle géométrique développée ici est générique et peut s'appliquer à l'ensemble des procédés DED. En effet, le descripteur géométrique ainsi que le paramètre opératoire à corriger sont communs à toutes les technologies DED existantes, que ce soit par dépôt de fil ou par projection de poudre. Le modèle de contrôle reliant descripteur et paramètre opératoire, est quant à lui propre au cas d'application présenté et doit être reconstruit pour chaque couple {matériau ; procédé}.

Comme mis en évidence dans le chapitre précédent, les champs thermiques de la pièce ont un impact significatif sur la géométrie déposée. Ainsi, la boucle de contrôle géométrique développée ici va être implémentée en parallèle de la boucle de contrôle thermique, afin de proposer un contrôle robuste de la géométrie de la pièce.

## V. Application d'une stratégie de monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM

### 1. Introduction

Cette section présente une première application de la stratégie de *monitoring* thermo-géométrique résultante de la mise en parallèle des deux boucles précédemment développées. A travers un cas d'application sur le procédé WAAM, la faisabilité de mise en œuvre de cette stratégie de *monitoring* thermo-géométrique va être démontrée et ses impacts sur le déroulement de la fabrication et les caractéristiques des pièces finales vont être investigués. L'objectif de cette étude est d'illustrer l'intérêt de mettre en œuvre des boucles de contrôles thermique et géométrique simultanément afin de maîtriser les procédés DED.

## 2. Méthode

### 2.1. *Démonstrateurs*

Cette étude porte sur un mur monocordon de 20 couches en acier inoxydable duplex 2209 fabriqué avec le procédé WAAM. Les dimensions nominales du mur sont de 100 mm de longueur et 40 mm de hauteur. Dans cette étude, trois exemplaires du mur sont fabriqués avec les paramètres opératoires détaillés en Tableau 3-3 :

- un mur fabriqué sans contrôle, avec une temporisation entre couches constante de 30 s ;
- un mur fabriqué avec la stratégie de *monitoring* thermique présentée dans le Chapitre 3, avec contrôle de  $T_{\text{int}}$  à chaque couche ;
- un mur fabriqué avec mise en œuvre simultanée des stratégies de *monitoring* thermique et géométrique, avec contrôle de  $T_{\text{int}}$  à chaque couche et corrections ponctuelles de TS.

Tableau 3-3 : paramètres opératoires utilisés dans le cas d'application du *monitoring* thermique au procédé WAAM.

	Mur fabriqué sans contrôle	Mur fabriqué avec contrôle thermique	Mur fabriqué avec contrôle thermo- géométrique
P	3760 W		
WFS	7,4 m/min		
TS	900 mm/min		Variable selon le contrôle de $h_{\text{couche}}$
Temps d'attente entre couches	30 s	Variable selon le contrôle de $T_{\text{int}}^{\circ}$	Variable selon le contrôle de $T_{\text{int}}^{\circ}$

### 2.2. *Matériaux*

Les spécimens de cette étude sont fabriqués à partir de fil fourni par Böhler Welding (FRANCE), de diamètre 1,2mm en acier inoxydable duplex de type 2209. La composition chimique du matériau est reportée en Tableau 3-4. Des plaques carrées de 150 mm de côté et 5 mm d'épaisseur en acier de construction métallique S355 sont utilisées comme substrat. Le mur est déposé au milieu des plaques.

Tableau 3-4 : composition du fil d'acier duplex 2209 utilisé dans cette étude.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N
0.01 %	0.5 %	1.5 %	0.018 %	0.001 %	22.8 %	3.1 %	8.4 %	<0.1 %	0.15 %

### 2.3. Montage expérimental

Le montage expérimental mis en œuvre pour cette application de *monitoring* thermo-géométrique au procédé WAAM est illustré en Figure 3-15. Il comprend les deux capteurs précédemment sélectionnés, c'est-à-dire la caméra thermique et le profilomètre laser, qui sont respectivement positionnés fixe et embarqué derrière la torche.



Figure 3-15 : montage expérimental pour le monitoring thermique et géométrique appliqué au procédé WAAM.

### 2.4. Mise en œuvre simultanée des deux boucles de contrôle

La mise en œuvre simultanée des deux boucles de contrôle thermique et géométrique développées est détaillée en Figure 3-16. Le contrôle thermique régit le temps d'attente entre chaque couche pour garantir le refroidissement de la pièce en dessous d'une température seuil – définie ci-après. Comme dans le chapitre précédent, la température d'interpasse à respecter entre chaque couche est fixée à 200°C – voir Section IV.2.4 du Chapitre 3. En parallèle, un contrôle géométrique de la pièce est effectué toutes les cinq couches, ce qui permet trois corrections en cours de fabrication, tout en garantissant une stabilisation de la hauteur de couche entre chaque correction. A chaque étape de contrôle géométrique, la hauteur de couche moyenne déposée dans le tronçon d'intérêt est calculée à partir du scan du profil de la pièce. Pour le tronçon suivant, la vitesse d'avance est réajustée en fonction de l'écart à la hauteur théorique de façon à compenser les potentielles dérives accumulées dans le tronçon courant. Il convient de mentionner que le temps de mise en œuvre du contrôle géométrique est compris dans le temps de refroidissement de la pièce pour respecter la température d'interpasse.

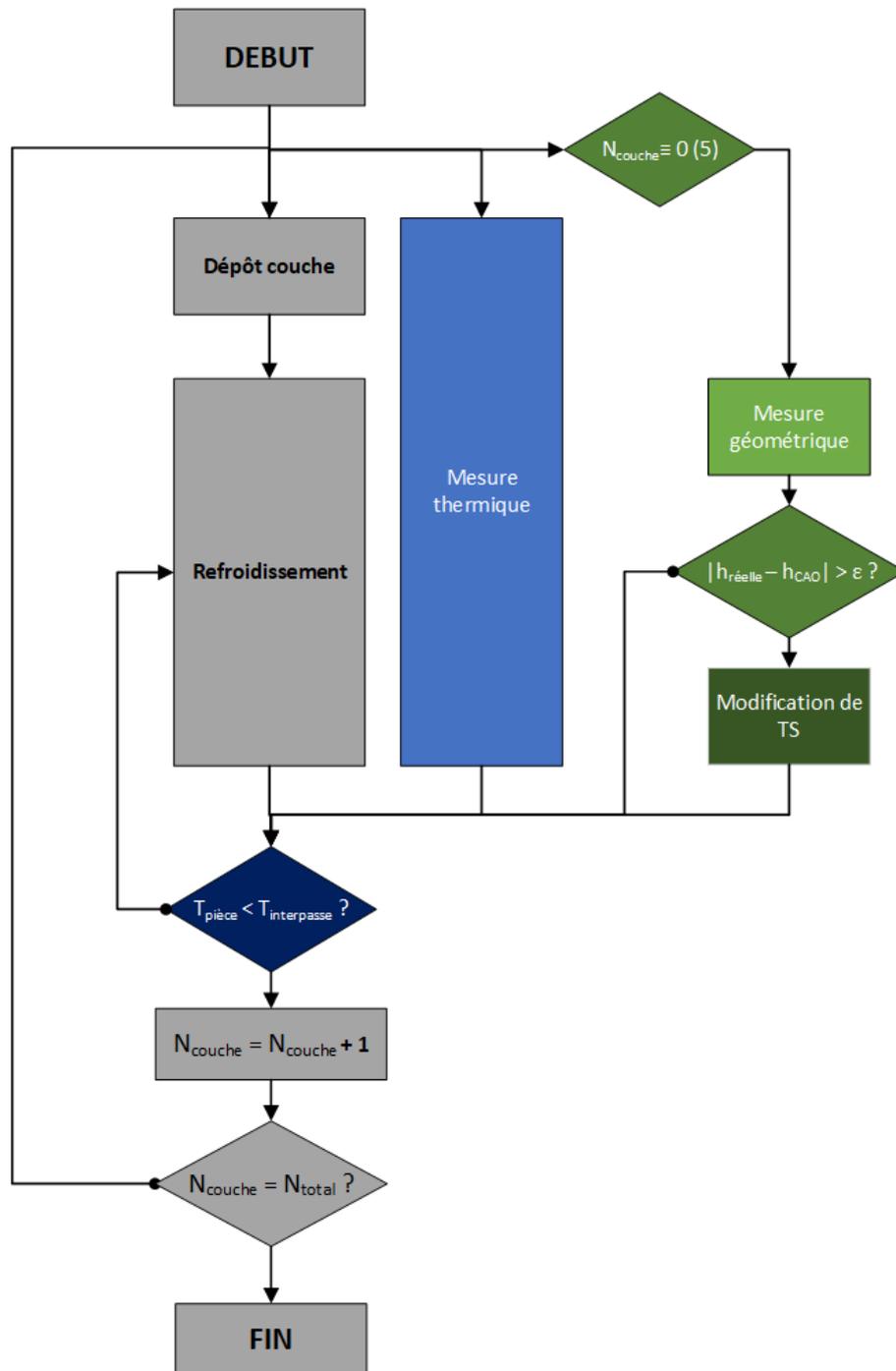


Figure 3-16 : algorithme de la stratégie de monitoring thermo-géométrique développée dans ces travaux.

Afin de mettre en œuvre la boucle de contrôle géométrique, il est nécessaire de définir la stratégie de correction de TS à partir de l'écart calculé entre la hauteur de couche réelle et la hauteur de couche de référence. La définition de cette stratégie de correction de TS va faire l'objet du paragraphe suivant.

### 2.5. Stratégie de correction pour la boucle de contrôle géométrique

- **Modèle de correction de TS**

Dans cette section, nous allons élaborer un modèle de correction de TS en fonction des dérives de hauteur de couche mesurées sur un tronçon. Il convient dans un premier temps de fixer le domaine d'application du contrôle, en définissant :

- un écart minimal en-dessous duquel aucune correction n'est mise en œuvre ;
- un écart maximal au-dessus duquel l'efficacité des corrections n'est plus garantie.

Dans un second temps, la fonction de correction de la vitesse d'avance sera définie.

Concernant la borne minimale d'application du contrôle, il convient de choisir un seuil minimal de l'ordre des précisions de la mesure ou du procédé. Dans notre cas, ces dernières ont toutes deux été évaluées à 0,1 mm – voir Section III.3. Les tronçons contrôlés contenant cinq couches, un écart de hauteur de couche de 0,02 mm est sélectionné comme borne minimale du domaine d'application du modèle de contrôle.

Concernant la borne maximale du contrôle, nous proposons de prendre en compte l'impact de la correction de TS sur la largeur de couche, étudié en Section IV.3. – voir Figure 3-14. Pour le cas considéré, nous avons observé qu'une variation de 200 mm/min de TS entraînait une variation de 15 % de la largeur du cordon. En première approche, il est donc choisi de borner la correction de vitesse à 200 mm/min, afin de limiter les variations de largeur et garantir le respect des tolérances géométriques fixées par le cahier des charges. Nous avons identifié que cette correction permettait de compenser un défaut de hauteur de couche inférieur à 2 mm à l'échelle d'un tronçon, soit 0,4 mm à l'échelle d'une couche. Cette valeur de 0,4 mm constitue donc la borne maximale d'applicabilité du contrôle. Pour des défauts supérieurs, il peut être envisagé de mettre en œuvre des corrections supplémentaires, comme une modification du nombre de couches restant à déposer [Garmendia 2018].

Pour ce cas d'application, le domaine de correction a été défini entre 0,02 et 0,4 mm d'écart de hauteur de couche. Dans ce domaine, des corrections de TS par paliers ont été choisi en première approche. Ces paliers de corrections ont été déterminés en fonction de l'abaque de la Figure 3-13 :

$$|\Delta TS| = \begin{cases} 100 \text{ mm/min}, & \text{si } |\delta h_c| \in ] 0,02 . 0,2 ] \text{ mm} \\ 200 \text{ mm/min}, & \text{si } |\delta h_c| > 0,2 \text{ mm} \end{cases}$$

A partir des discussions menées ci-dessus, le modèle de correction de TS dans ces travaux est illustré en Figure 3-17.

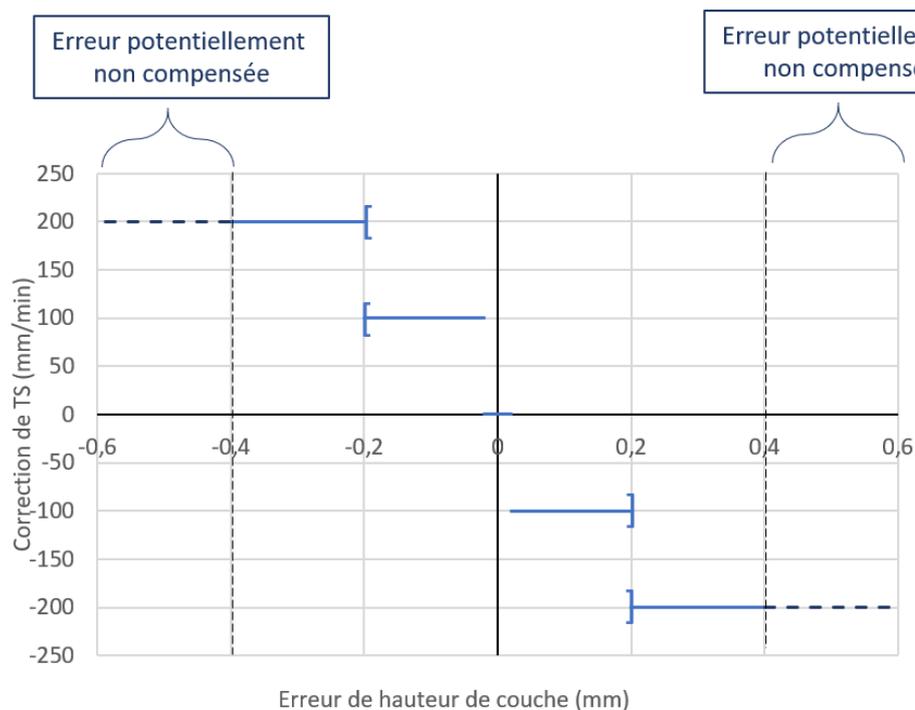


Figure 3-17 : modèle de contrôle mis en œuvre pour le cas d'application de monitoring géométrique au WAAM.

- Démarrage du contrôle à la deuxième couche

Comme illustré Figure 3-17, le modèle de contrôle de TS permet de compenser de faibles erreurs de hauteur de couche réelle par rapport à la hauteur de couche consigne. Or, la phase d'accroche de la première couche peut engendrer une erreur de hauteur dès le début de la fabrication, qui s'accumule avec les déviations suivantes et entraîne un défaut non compensable par le contrôle précédemment développé. Afin de pouvoir démontrer l'efficacité des méthodes de *monitoring* proposées, il est donc choisi de démarrer le contrôle à la 2<sup>e</sup> couche. Ainsi, en pratique, la hauteur de la 1<sup>e</sup> couche, mesurée directement après dépôt, sert de référence pour la mesure de hauteur du premier tronçon.

## 2.6. Analyses post-fabrication

De la même manière que dans le chapitre précédent, une analyse complémentaire de la géométrie des couches est effectuée sur des macrographies des murs avec un microscope confocal Alicona. La proportion de Ferrite est également évaluée avec des mesures au Ferritscope. Pour ces deux analyses post-fabrication, les échantillons sont coupés au centre des murs, pour éviter les effets de bords liés aux arrêts/départs des dépôt. Une attaque électro-chimique avec de l'acide oxalique pendant 5 s est réalisée pour révéler les grains et l'interface entre les couches.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Démonstrateurs

Les trois murs fabriqués dans le cadre de l'application de la stratégie de *monitoring* thermo-géométrique au procédé WAAM sont illustrées en Figure 3-18. Les dimensions des trois murs à partir de la deuxième couche sont reportées en Tableau 3-5. Nous pouvons constater que le mur fabriqué sans contrôle et celui avec contrôle thermique seul sont en-dessous de la hauteur souhaitée, ce qui rejoint les résultats observés dans le chapitre précédent. Le mur fabriqué avec la stratégie de *monitoring* thermo-géométrique atteint la hauteur cible.

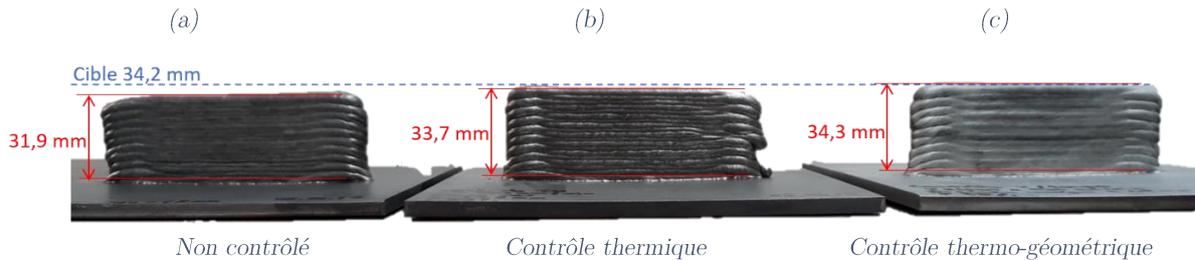


Figure 3-18 : illustration des trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM.

Tableau 3-5 : caractéristiques géométriques finales des trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM.

	Cible	Sans contrôle	Contrôle TH	Contrôle TH-GEO
Hauteur du mur dans la plage contrôlée (couche 2-20)	34,2 <sup>+0,2</sup> mm	31,9 mm	33,7 mm	34,3 mm

#### 3.2. Analyse des mesures in-situ

- Evolution de la température

Les températures d'interpasse mesurées par la caméra thermique en cours de fabrication et les temps d'attente entre couches sont présentés en Figure 3-19. Comme dans le chapitre précédent, nous constatons en Figure 3-19.a que la température d'interpasse de la fabrication non contrôlée augmente jusqu'à atteindre 700°C pour les dernières couches. Dans les deux autres essais, le seuil de 200°C est respecté grâce au contrôle thermique mis en œuvre et à l'ajustement du temps d'attente – voir Figure 3-19.b. Dans le cas du mur fabriqué avec les contrôles thermique et géométrique simultanés, un incident lié à l'analyse en temps réel des mesures a provoqué un temps d'attente significativement plus long pour la 5<sup>e</sup> couche et induit une température d'interpasse largement inférieure au seuil fixé par le contrôle thermique. La température du mur étant retombée à une valeur proche de celle reportée à la 1<sup>e</sup> couche, les temps d'attente pour les couches suivantes

sont similaires à ceux des premières couches. A partir de la 8<sup>e</sup> couche jusqu'à la fin de la fabrication, nous pouvons observer que les temps d'attente mis en œuvre se rapprochent de ceux de la fabrication avec contrôle thermique seul.

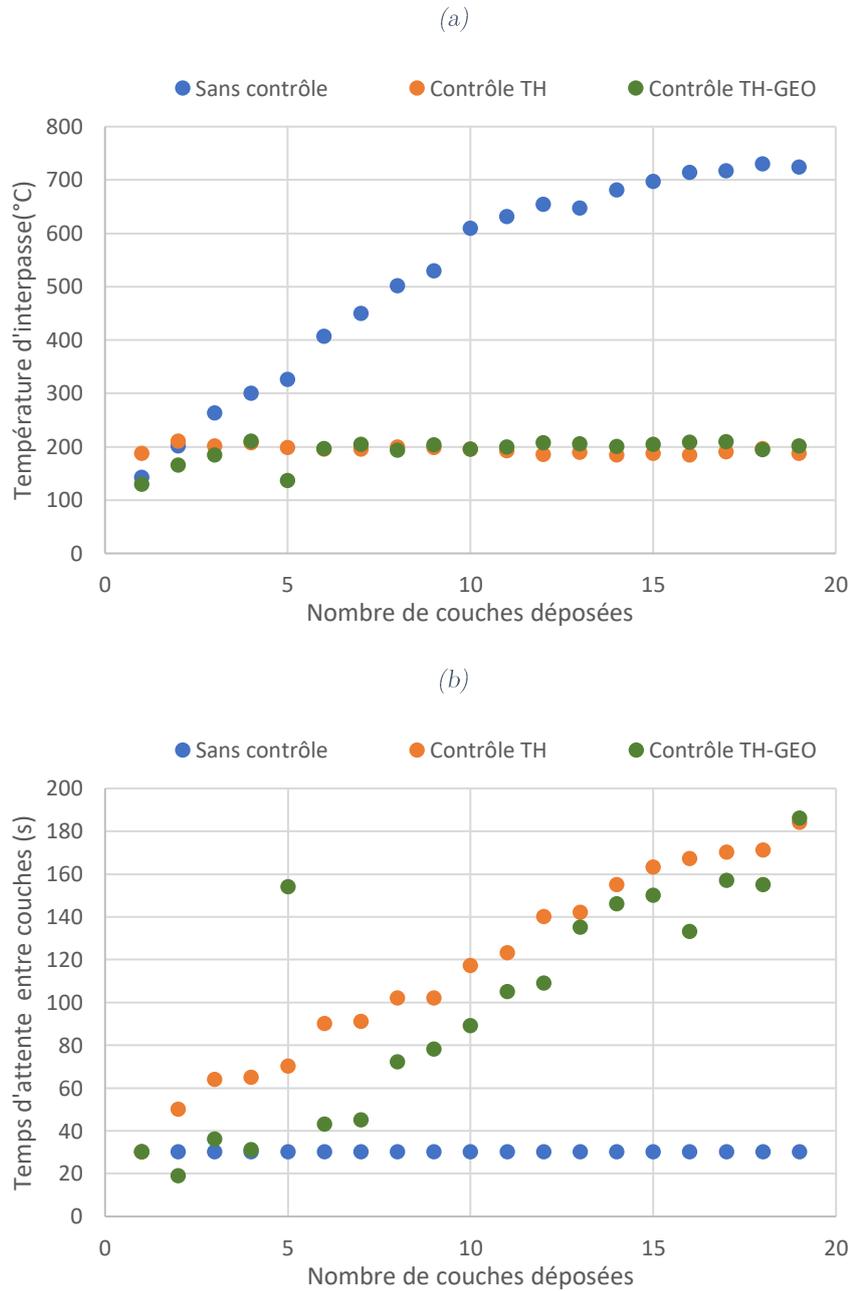


Figure 3-19 : (a) températures d'interpasse mesurées, (b) temps d'attente entre couches pour les trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM.

- Evolution de la hauteur du mur

Les écarts relevés en cours de fabrication entre la hauteur mesurée et la hauteur théorique sont illustrés en Figure 3-20. Conformément à la stratégie de mesure, ces écarts sont mesurés pour les couches 5, 10, 15 et 20. Les évolutions de TS correspondantes sont illustrées en Figure 3-20.

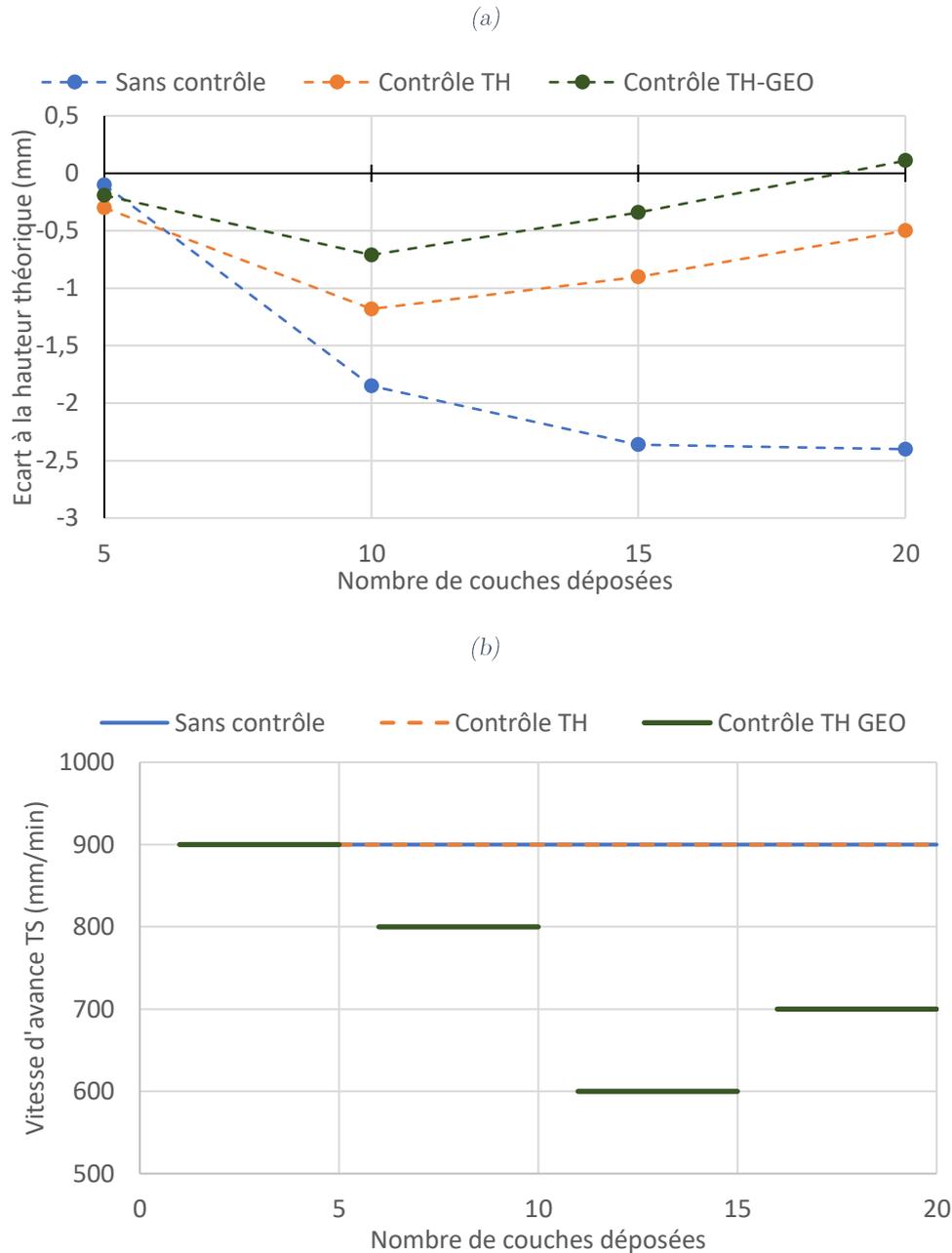


Figure 3-20 : (a) évolution des écarts entre la hauteur mesurée et la hauteur cible, (b) évolution de TS pour les trois fabrications du cas d'application de la stratégie de monitoring thermo-géométrique.

Dans le cas de la fabrication sans contrôle, la hauteur déposée est inférieure à la hauteur théorique. Un défaut de hauteur s'accumule au cours de la fabrication et semble stagner au dernier tronçon. L'ajout du contrôle de la température d'interpasse permet de limiter ce défaut en cours de fabrication, voire d'amorcer une compensation de ce défaut en fin

de fabrication. Dans le cas de la stratégie de contrôle thermo-géométrique, la correction de TS permet de compenser ce défaut et d'inverser la tendance pour rendre la hauteur déposée au dernier tronçon supérieure à la hauteur cible.

### 3.3. *Etude qualitative des pièces post-fabrication*

- *Etude de la géométrie finale*

Le profil des couches de chaque mur est étudié sur des macrographies illustrées en Figure 3-21.

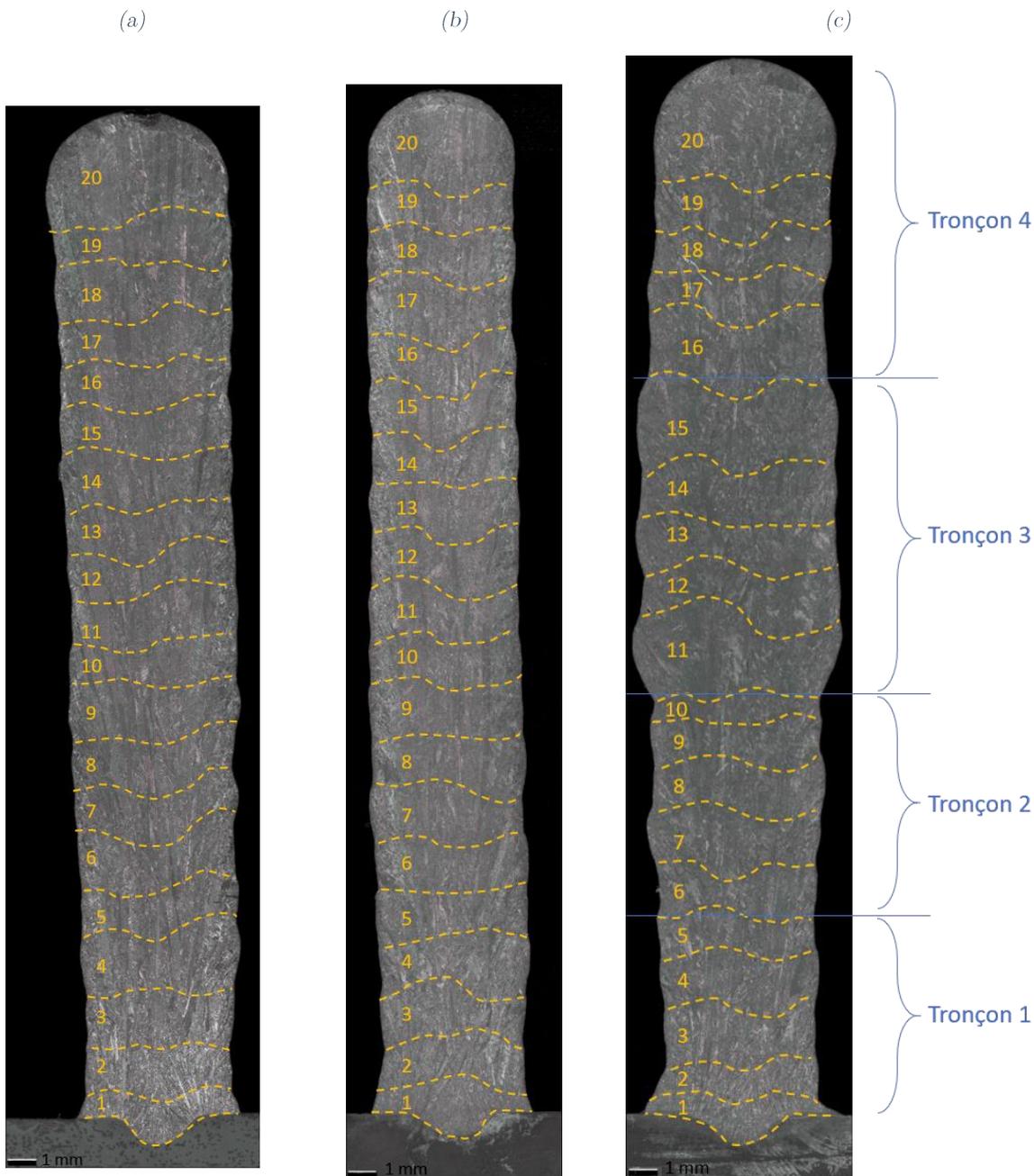


Figure 3-21 : macrographies des trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM. (a) mur non contrôlé, (b) mur avec contrôle thermique, (c) mur avec contrôle thermo-géométrique.

Nous pouvons constater que le mur fabriqué sans contrôle est le plus bas et que le mur fabriqué avec contrôle thermo-géométrique est légèrement plus haut que le spécimen fabriqué avec contrôle thermique seul. Par ailleurs, comme dans le chapitre précédent, une augmentation progressive de la largeur du mur dans le cas d'une fabrication sans contrôle ainsi qu'une largeur constante dans le cas d'une fabrication avec contrôle thermique sont à nouveau observées. Concernant le troisième spécimen fabriqué avec contrôle thermo-géométrique, des variations significatives de largeur, dues aux corrections de vitesses en cours de fabrication, sont visibles le long du mur.

A partir des macrographies de la Figure 3-21, les hauteurs et largeurs effectives de couche sont illustrées en Figure 3-22.

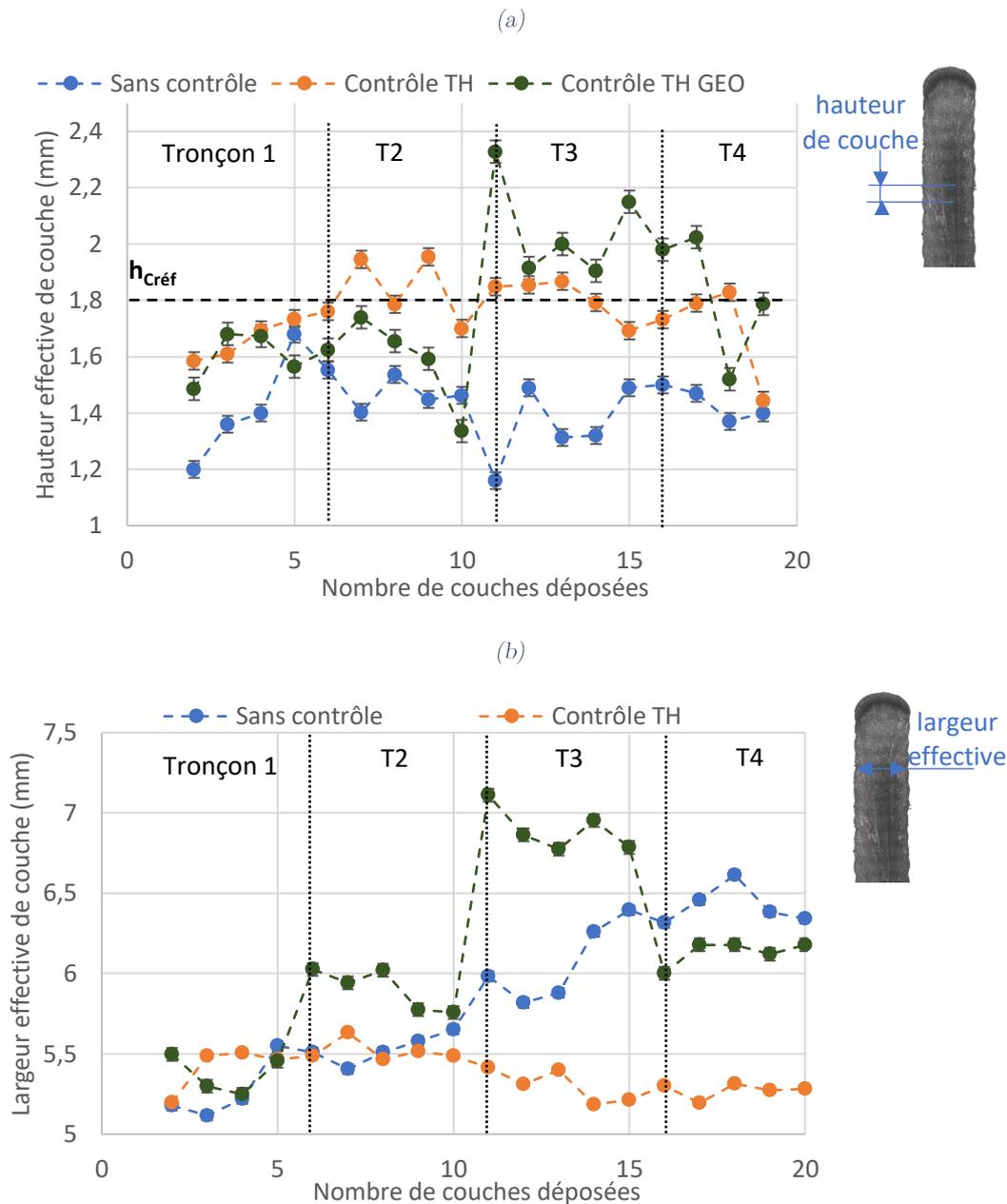


Figure 3-22 : évolution des caractéristiques géométriques des trois murs fabriqués dans le cadre de l'application du monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM. (a) hauteur de couche, (b) largeur effective de couche.

Nous pouvons constater que le mur fabriqué sans contrôle, en bleu en Figure 3-22, ne satisfait pas le cahier des charges à cause de hauteurs de couche déposées très inférieures à la consigne. Par ailleurs, le mur subit une augmentation de largeur de 30% en cours de fabrication, du fait de l'accumulation de chaleur. Concernant le mur fabriqué avec contrôle thermique, en orange en Figure 3-22, la hauteur de couche se stabilise au bout de la 5<sup>e</sup> couche et oscille légèrement autour de la hauteur consigne pour le reste de la fabrication. Pour ce mur, le non-respect de la hauteur cible est donc dû aux hauteurs des premières couches, inférieures à 1,8 mm et non compensées par les suivantes.

Concernant le mur contrôlé sur les aspects géométrique et thermique, en vert en Figure 3-22, nous pouvons observer les effets des corrections de TS sur la géométrie des couches. En particulier, la correction mise en œuvre au tronçon n°3 permet de compenser le manque de hauteur accumulé en début de fabrication – voir Figure 3-22.a. Il convient également de noter que l'augmentation de TS de 200 mm/min au tronçon n°3 a causé une importante refusion de la 10<sup>e</sup> couche – voir Figure 3-20.b. Les corrections de TS mises en œuvre aux tronçons n°2 et 4 de 100 mm/min n'ont pas un effet significatif sur la hauteur de couche. A l'inverse, en Figure 3-22.b, différents paliers de largeur effective de couche peuvent être associés aux corrections de TS. Notamment, une augmentation de 15 % de la largeur est observée pour le tronçon n°3, liée à l'augmentation de TS de 200 mm/min. Cette variation de 15 % correspond à la limite maximale de variation de largeur fixée lors de la construction du modèle de contrôle de TS. Ces observations pourront être prises en compte afin d'améliorer le modèle de contrôle pour de futurs cas d'application.

Les moyennes et écarts types des dimensions des couches sont reportés en Tableau 3-6.

Tableau 3-6 : moyennes et écarts types des dimensions des couches des différentes fabrications.

	Hauteur de couche		Largeur effective	
	Moyenne (mm)	STD (mm)	Moyenne (mm)	STD (mm)
Sans contrôle	1,52	0,13	5,82	0,48
Contrôle thermique	1,81	0,12	5,37	0,13
Contrôle thermo- géométrique				
Tronçon 1 : couches 2-5	1,60	0,093	5,37	0,12
Tronçon 2 : couches 6-10	1,58	0,15	5,90	0,13
Tronçon 3 : couches 11-15	2,06	0,17	6,89	0,14
Tronçon 4 : couches 16-20	1,82	0,22	6,13	0,07

La considération des écarts types des mesures pour chaque tronçon du mur fabriqué avec *monitoring* thermo-géométrique permet d'évaluer l'impact des corrections sur la stabilité géométrique des couches. Tout d'abord, il convient de remarquer un écart type stable tronçon après tronçon. Du point de vue de la largeur effective, nous remarquons une dispersion similaire au cas fabriqué avec contrôle thermique seul. Concernant la hauteur de couche, la dispersion relevée sur les tronçons est légèrement supérieure à celle obtenue avec le contrôle thermique. La stratégie de correction mise en œuvre permet donc de conserver la stabilité de dépôt au sein d'un tronçon.

- Etude des proportions de Ferrite

De la même manière que dans le chapitre précédent, le pourcentage de Ferrite (%Fe) fait partie des critères du cahier des charges et est évalué le long des murs avec une mesure tous les 2 mm. Les évolutions correspondantes sont illustrées en Figure 3-23. Pour rappel, un pourcentage de Ferrite cible à  $50 \pm 10\%$  est requis pour ce type de fabrication.

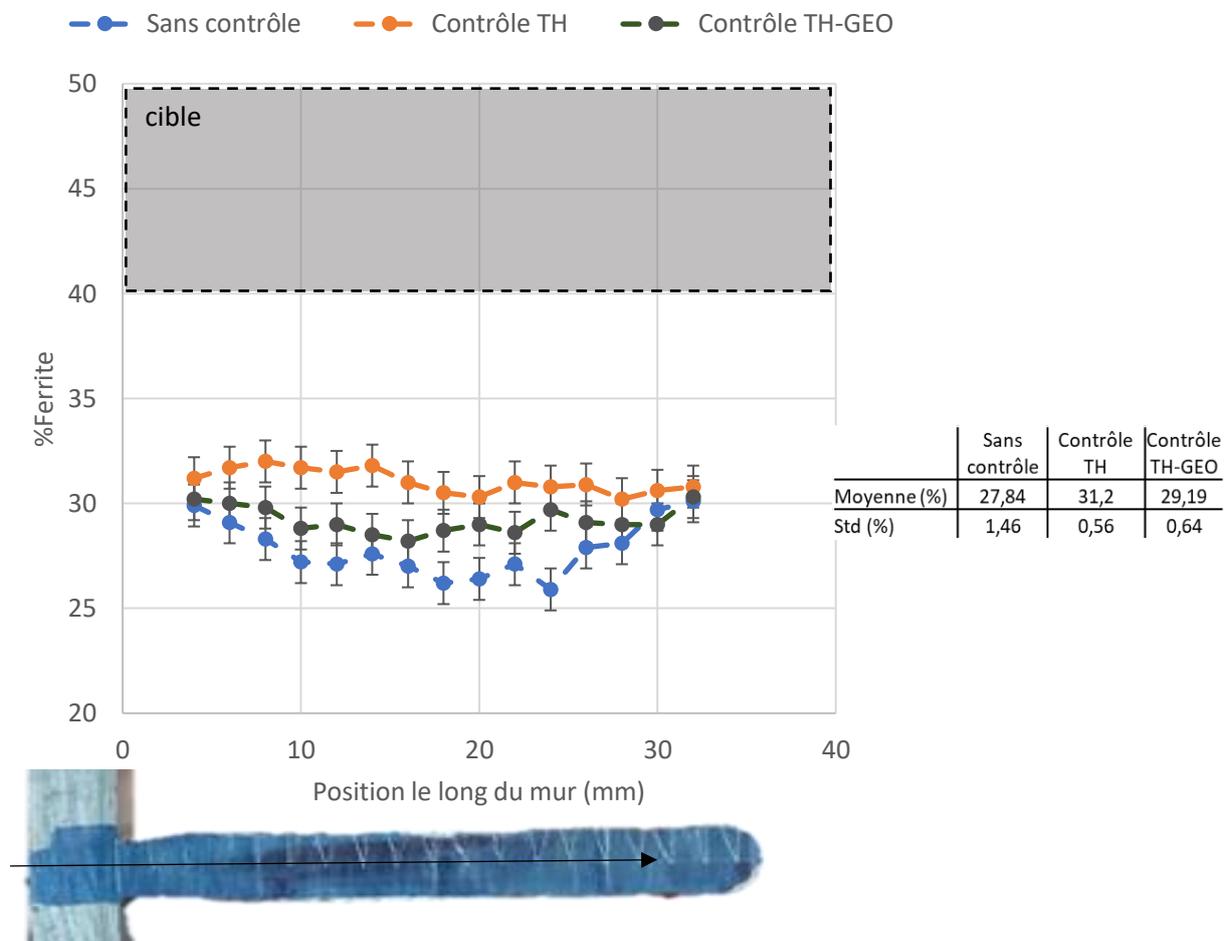


Figure 3-23 : évolution de la proportion de Ferrite le long des trois murs fabriqués pour l'application de monitoring thermo-géométrique au procédé WAAM.

En Figure 3-23, les trois murs n'atteignent pas la proportion de Ferrite (%Fe) visée par le cahier des charges. Comme dans le chapitre précédent, le mur fabriqué sans contrôle présente le %Fe le plus faible, avec une baisse significative au milieu du mur, due à l'accumulation de chaleur subie en cours de fabrication – voir Chapitre 3 Section IV.3.3. Par ailleurs, le mur fabriqué avec contrôle thermique présente une proportion de Ferrite stable le long du mur, de l'ordre de 31 %. Concernant le mur fabriqué avec *monitoring* thermo-géométrique, le respect de la température d'interpasse entre chaque couche a permis de garder une proportion de Ferrite stable le long du mur et d'éviter l'apparition d'une baisse au milieu du mur. Cependant, l'ajout de la correction de TS dans le but de maîtriser la géométrie a eu un impact sur l'évolution du %Fe. En effet, ce mur présente une proportion moyenne de 29%, plus faible que le spécimen contrôlé seulement en température, tout en restant supérieur au %Fe du spécimen fabriqué sans contrôle. Des analyses supplémentaires seraient nécessaires pour affiner la compréhension des effets des corrections de TS sur le %Fe.

#### 4. Bilan

Le cas d'application présenté dans cette section permet de dresser des premières conclusions sur les effets d'un *monitoring* thermo-géométrique sur le procédé WAAM. Il convient d'insister sur la compatibilité des stratégies de correction mises en œuvre et les faibles impacts relevés d'une correction sur l'autre aspect de la fabrication. Cet élément constitue un atout principal de la stratégie de *monitoring* thermo-géométrique proposée. Par ailleurs, la mise en parallèle des deux boucles de contrôle a permis de limiter la propagation d'un défaut de hauteur avec le contrôle thermique et de le corriger sur les couches suivantes avec la correction géométrique. Ce résultat constitue un apport majeur de la stratégie de *monitoring* thermo-géométrique développée dans ces travaux et montre l'intérêt de mettre en œuvre une stratégie de *monitoring* thermo-géométrique telle que proposée dans ces travaux.

## VI. Conclusion

Ce chapitre présente une nouvelle stratégie de *monitoring* thermo-géométrique construite à partir de la mise en parallèle de deux boucles de contrôle thermique et géométrique. Le cas d'application présenté a permis de montrer que la stratégie de *monitoring* thermo-géométrique développée apporte des moyens pertinents de maîtriser l'évolution de la fabrication pour des pièces à paroi fine et à faible nombre de couches et permet d'obtenir la pièce optimale en termes de dimensions et de proportion de Ferrite souhaitées. L'intérêt de la stratégie proposée prend d'autant plus son sens pour des pièces de plus grande envergure, avec un nombre important de couches, où les déviations par rapport au point de fonctionnement optimal sont fréquentes.

Les variations de la géométrie des cordons, provoquées par les corrections issues de la boucle de contrôle géométrique, modifient le *Stick Out* en cours de fabrication. Afin d'appréhender les variations de SO et de garantir des conditions de dépôt constantes malgré les corrections géométriques, nous proposons d'ajouter un contrôle du SO. Cet axe de contrôle fera donc l'objet du chapitre suivant.



# Chapitre 4 : Investigations du potentiel de contrôle via des mesures sonores et proposition d'une stratégie de *monitoring* du *Stick Out* pour le procédé WAAM

## I. Introduction

Comme mentionné dans l'introduction de ce manuscrit, le *Stick Out* impacte plusieurs éléments constitutifs du procédé, qui sont schématisés en Figure 4-1. Notamment, le SO régit le comportement de l'arc [Pal 2009], les mouvements fluides du bain de fusion [Arata 1981, Saad 2006] et peut avoir une influence sur les paramètres de soudage [Saini 1998] ainsi que sur la quantité de matière déposée [Grad 2004, Pickin 2006, Cai 2018]. Ainsi, le SO et la géométrie de la pièce ont des interactions qu'il est nécessaire de maîtriser afin de garantir le respect des tolérances géométriques finales.

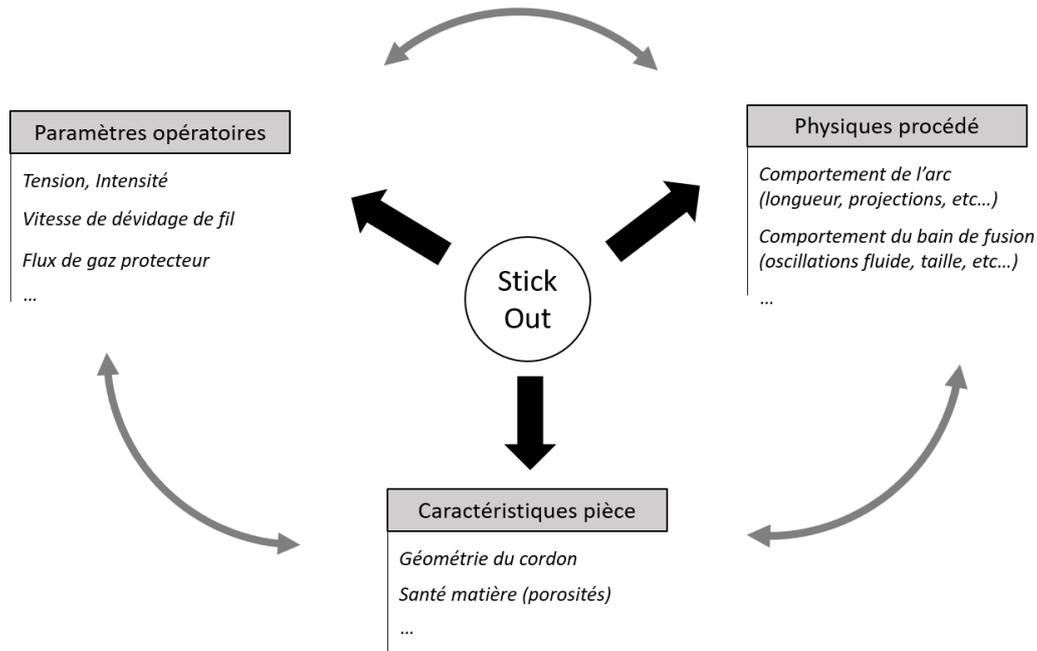


Figure 4-1 : illustration des différents effets du *Stick Out*.

Pour cette troisième boucle de contrôle dédiée au SO, il est proposé d'orienter les travaux vers des techniques de *monitoring* originales et non-invasives du procédé. En particulier,

dans le prolongement de la capacité des opérateurs expérimentés à estimer la qualité des soudures à l'écoute des sons générés par l'arc électrique, le son est choisi pour mener ces travaux. En effet, le son généré par l'arc électrique étant un indicateur de la stabilité des conditions de dépôt [Saini 1998, Grad 2004, Horvat 2011], qui est elle-même dépendante du SO, nous pensons que le spectre sonore renferme des descripteurs associés discriminants. Par ailleurs, proposer des méthodes de contrôle sonore permettrait d'appréhender certains phénomènes de la fabrication – comportement de l'arc, oscillations fluides dans le bain de fusion, transfert de métal etc – habituellement difficiles à mesurer par des moyens de mesure classiques, notamment à cause de l'environnement hostile rencontré en DED.

Dans ce chapitre, nous proposerons tout d'abord une méthode de mesure sonore appliquée au procédé WAAM. Nous étudierons ensuite les descripteurs contenus dans le spectre sonore et chercherons plus particulièrement à identifier un descripteur corrélé avec le SO. A partir de ces investigations, une stratégie de contrôle sonore dédiée au WAAM sera proposée. Enfin, dans l'optique de proposer une méthodologie générique dédiée aux procédés DED, les perspectives d'application au procédé LMD de la stratégie de contrôle sonore proposée seront discutées en fin de chapitre.

## II. Etat de l'art des stratégies de monitoring sonore

A l'heure actuelle, peu d'applications de *monitoring* sonore sont proposées pour les procédés de fabrication additive DED : les travaux recensés en ce sens sont très récents et concernent uniquement le procédé LMD [Gaja 2017, Koester 2018]. Afin de dresser un aperçu plus complet des techniques de *monitoring* sonore existantes, il est proposé d'étendre l'état de l'art à d'autres procédés, tels que le procédé *Fused Filament Fabrication* [Wu 2019], ou le procédé SLM [Wasmer 2017]. Par ailleurs, il convient d'étudier les applications de contrôle sonore à divers procédés de soudage : le GMAW [Morris 1994, Saini 1998, Van Bohemen 2001, Grad 2004, Horvat 2011], le soudage par CO<sub>2</sub> [Arata 1981], le PAW [Wang 2001, Saad 2006] et le soudage MIG [Pal 2009].

Les stratégies de contrôle sonore relevées dans la littérature sont schématisées en Figure 4-2 : deux techniques sont principalement mises en œuvre. La première technique de contrôle, appelée Emission Acoustique (EA), se rapproche des techniques de Contrôle Non Destructifs (CND) et utilise un capteur piézoélectrique (PZ). Cette technique se base sur l'écoute des ondes acoustiques générées dans des pièces soumises à des sollicitations. La deuxième technique de contrôle, via microphone dynamique (MD) ou statique (MS), considère les variations de pression dans l'air, ou ondes sonores, générées par différents phénomènes en cours de procédé. Comme illustré en Figure 4-2, ces deux

stratégies permettent de contrôler le procédé sur deux axes : le contrôle de la santé matière et le contrôle de la stabilité du procédé en cours de fabrication.

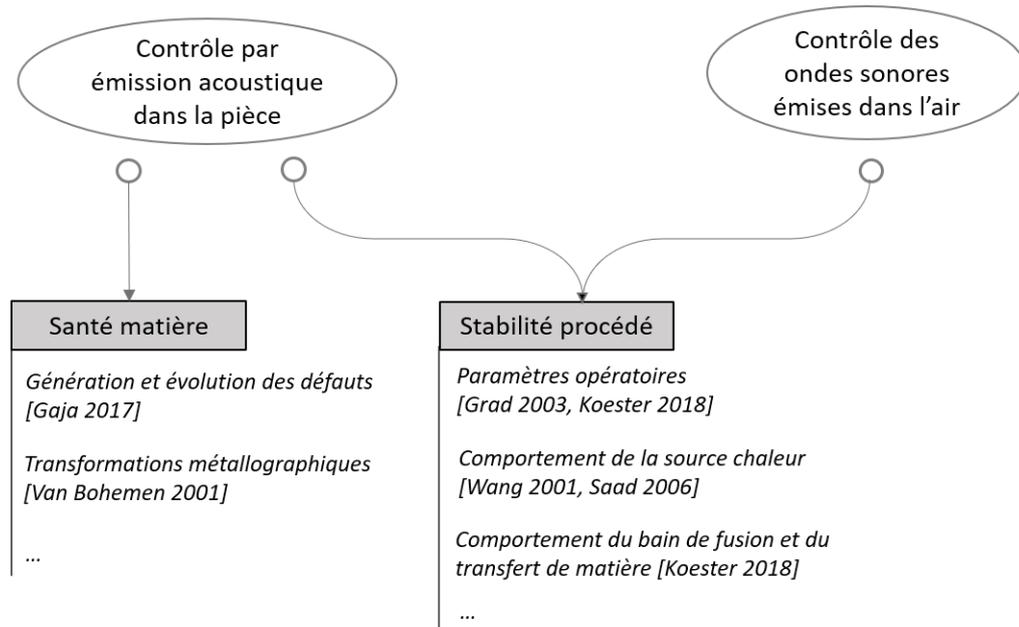


Figure 4-2: schéma récapitulant les deux approches de monitoring sonore des procédés relevées dans la littérature.

La technique d'EA est principalement utilisée pour contrôler la santé matière de la pièce. D'une part, cette technique de mesure permet de détecter la génération de défaut en temps réel, comme cela a été montré dans les travaux de Gaja *et al.* sur le procédé LMD [Gaja 2017]. Dans ces travaux, des descripteurs temporels sont extraits des signaux sonores par Analyse de Composantes Principales pour permettre de discriminer différents types de défauts – porosités ou fissures. Avec ces descripteurs, les différentes fabrications sont ensuite classées suivant le type de défaut généré par des méthodes de *K-means* [Gaja 2017]. D'autre part, il est également possible de prévoir la microstructure via une mesure acoustique : les travaux de Van Bohemen ont mis en évidence une corrélation entre la valeur RMS du signal temporel d'un capteur PZ et la formation de Martensite pour l'acier 42CrMo4 dans le cas du procédé GMAW [Van Bohemen 2001].

Comme indiqué en Figure 4-2, la mesure par EA peut également être mise en œuvre pour caractériser la signature acoustique du procédé. En ce sens, Koester *et al.* ont instrumenté le dessous de la table de dépôt d'une machine LMD avec un tableau de 5x5 capteurs PZ et ont enregistré les signaux sonores de plusieurs scénarios de fabrication : dépôt normal, dépôt avec débit de poudre insuffisant, débit de poudre seul, dépôt avec puissance insuffisante [Koester 2018]. Des descripteurs fréquentiels, tels que le Centre de Gravité Spectral (CGS), ont été considérés pour discriminer les différentes conditions de dépôt. De la même manière, Wu *et al.* ont comparé les ondes acoustiques générées par des fabrications correctes et incorrectes du procédé *Fused Filament Fabrication*. Pour cela, ils ont considéré des caractéristiques du signal temporel – nombre de pics, amplitude et

énergie du signal – pour discriminer les différentes fabrications et ont employé des moyens de *clustering* et de *machine learning* pour classer les différents signaux [Wu 2019]. Selon Wu, cette méthode de contrôle développée est prometteuse pour une application de contrôle en temps réel [Wu 2019]. Enfin, concernant le procédé SLM, la stratégie proposée par Wasmer *et al.*, couplant de la mesure EA avec des méthodes de type « réseau de neurones », considère également des descripteurs temporels et offre des perspectives intéressantes de *monitoring* [Wasmer 2017].

Les différentes études privilégiant l’EA montrent que cette technique offre des moyens de caractérisations fiables de différents scénarios pour plusieurs procédés. De récentes pistes de contrôle prometteuses ont d’ores et déjà été proposées pour le procédé LMD et pourront servir de base à l’élaboration de stratégies de *monitoring* sonore [Gaja 2017, Koester 2018]. Cependant, la complexité du signal recueilli par EA nécessite l’utilisation de méthodes de traitement et de classification non triviales, ce qui peut complexifier la mise en œuvre d’un contrôle en temps réel. De plus, la nécessité d’adapter la table de dépôt de la machine ou le substrat pour effectuer une mesure acoustique peut être un frein supplémentaire à l’implémentation de cette méthode de mesure. Par ailleurs, nous pouvons nous questionner sur la pertinence de l’instrumentation par le substrat des moyens EA pour contrôler des pièces grandes échelles et massives.

Concernant les procédés de soudage, un microphone statique est le capteur privilégié pour contrôler la stabilité de la fabrication. Tout d’abord, plusieurs auteurs ont proposé une analyse détaillée des sons produits en cours de soudage : une conclusion commune est l’identification de l’allumage de l’arc électrique comme source principale d’ondes sonores générées en cours de soudage – voir Figure 4-3 [Arata 1981, Saini 1998, Grad 2004, Horvat 2011]. Par ailleurs, les signatures acoustiques des procédés de soudage par CO<sub>2</sub>, GMAW et MIG ont été caractérisées respectivement dans les travaux [Saini 1998, Arata 1981, Pal 2009]. Il a été montré que de nombreux descripteurs fréquentiels et temporels étaient corrélés avec certains phénomènes apparaissant en cours de procédés. Concernant les descripteurs temporels, un lien entre l’amplitude des ondes sonores et le comportement du bain de fusion a été mis en évidence pour les procédés GMAW [Arata 1981] et PAW [Saad 2006]. La considération de critères statistiques pour analyser le spectre temporel, comme le facteur adimensionné Kurtosis, peut permettre de quantifier la stabilité de dépôt, caractérisée par exemple avec la notion de rendement de dépôt [Grad 2004, Pal 2009]. Dans le domaine fréquentiel, la forme de la Transformée de Fourier et les amplitudes des fréquences relevées varient en fonction des modes de soudage et des paramètres [Saini 1998, Pal 2009]. A travers l’étude de la transformée de Fourier, plusieurs travaux ont identifié différentes fréquences liées au fonctionnement mécanique des procédés : c’est le cas de la fréquence de pulsation d’intensité [Arata 1981, Pal 2009], de la fréquence de court-circuit [Saini 1998], ou de la fréquence de détachement de goutte [Arata 1981, Grad 2004]. L’identification de la fréquence de goutte est particulièrement

illustrée en Figure 4-4 dans le cas des travaux de Grad *et al.* [Grad 2004]. Par ailleurs, Grad *et al.* ont mis en évidence une corrélation entre le SO et l'amplitude du signal sonore mesuré : ces résultats sont rappelés en Figure 4-5 [Grad 2004].

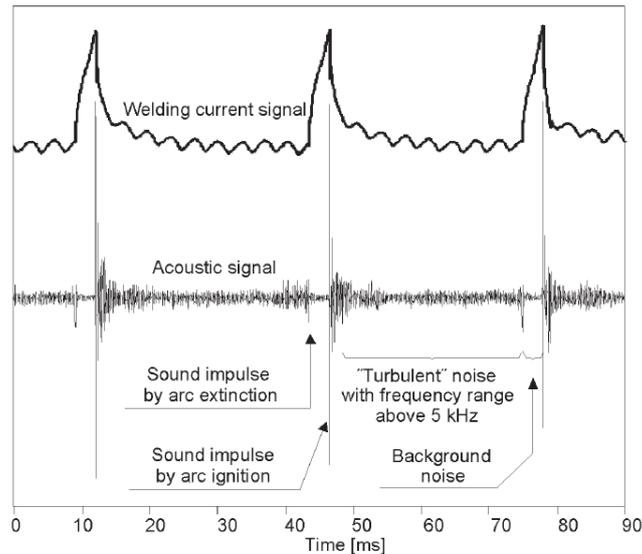


Figure 4-3 : mise en évidence des sons générés par l'arc électrique et évolution de l'intensité de soudage correspondante [Horvat 2011].

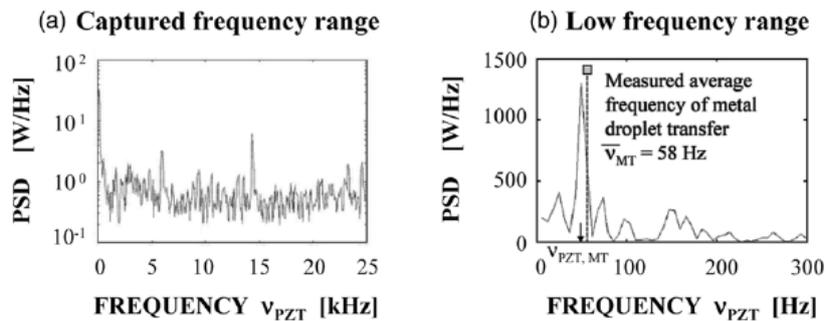


Figure 4-4 : identification de la fréquence de dépôt de goutte du procédé GMAW dans les mesures sonores d'un microphone piézoélectrique [Grad 2004].

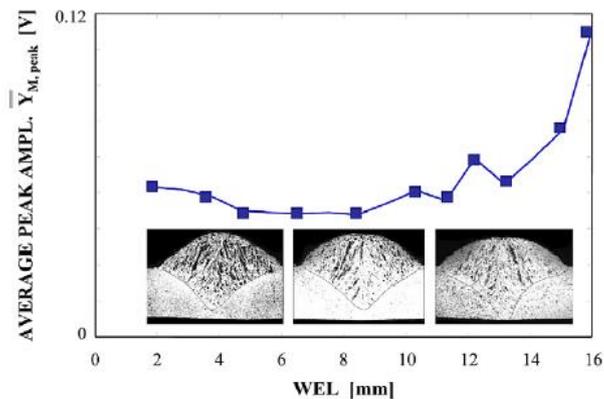


Figure 4-5 : corrélation entre l'amplitude du signal mesuré par un microphone statique et le Stick Out – WEL – pour le procédé GMAW [Grad 2004].

Dans la littérature, certaines études ont proposé des stratégies de *monitoring* à partir des moyens acoustiques mentionnés précédemment. Notamment, Saini *et al.* ont discuté de

manière approfondie la pertinence de plusieurs critères d'analyse du spectre sonore, dimensionnés et adimensionnés, vers un contrôle du procédé GMAW [Saini 1998]. Pal *et al.* ont mené le même type de discussion des critères d'analyse du signal temporel pour contrôler la stabilité du procédé *Pulsed-MIG* [Pal 2009]. Morris a breveté une stratégie de *monitoring* du procédé GMAW permettant d'estimer la qualité de la soudure, via la considération d'un indicateur numérique issu d'un réseau de neurones considérant des descripteurs sonores fréquentiels et temporels [Morris 1994]. Horvat *et al.* ont développé un modèle analytique reliant niveau sonore à intensité, dans l'optique de limiter le bruit généré par l'arc électrique en cours de soudage et prévenir les risques chez les soudeurs [Horvat 2011]. Plusieurs stratégies de contrôle sonore ont été recensées pour caractériser à l'aide de descripteurs fréquentiels les différentes phases constituant le soudage PAW [Wang 2001, Saad 2006].

L'étude bibliographique précédemment détaillée pour l'utilisation d'un microphone à des fins de contrôle sonore pour les procédés de soudage est approfondie en Tableau 4-1. Le caractère non-intrusif de la mesure rend la méthode indépendante à la géométrie et la taille de la structure à déposer, ce qui est un réel avantage par rapport à l'instrumentation de capteurs piézoélectriques (PZ). Cependant, l'analyse du Tableau 4-1 montre que les applications de contrôle via microphone statique positionnent ce capteur systématiquement embarqué sur la torche, à une distance souvent importante du point de dépôt. Ce montage peut se révéler non optimal pour les environnements de Fabrication Additive LMD et WAAM, dû à un environnement de travail réduit ou à l'utilisation de trajectoires multiaxes. L'utilisation d'autres types de microphones plus couteux comme dans les travaux de Saad [Saad 2006], permettrait de réduire l'encombrement.

Concernant le traitement des données, nous pouvons constater qu'un signal sonore temporel est souvent riche et complexe à analyser [Saini 1998, Wang 2001], là où les données sonores sont souvent plus ordonnées et facilement accessibles dans le domaine fréquentiel [Arata 1981, Grad 2004]. Cependant, comme il peut être observé en Tableau 4-1, les plages de fréquences analysées sont souvent très larges, ce qui peut nécessiter des temps de traitement longs, incompatibles avec une mise en œuvre en temps réel. Nous pouvons donc nous questionner sur la nécessité de considérer une large bande de fréquences dans le traitement des données pour réaliser un contrôle sonore du procédé. Par ailleurs, il convient de noter que les descripteurs fréquentiels choisis dans la littérature sont uniquement de type énergétique et se focalisent sur les amplitudes relevées dans la Transformée de Fourier – voir Tableau 4-1. Des stratégies de contrôle plus simples et potentiellement plus rapides peuvent exister. Notamment, la considération des fréquences identifiées directement dans la signature acoustique du procédé permettrait de faciliter le traitement [Morris 1994, Saad 2006, Wasmer 2017].

Tableau 4-1 : détail des différentes techniques de contrôle des procédés de soudage par des moyens sonores.

Publication		Montage expérimental		Traitement des données	
Référence	Procédé	Capteur	Position	Domaine	Descripteurs
Arata 1981	CO2 Welding	PZ	Sur la table	F : 0 - 3kHz	F : <i>Acceleration vibration level</i>
Morris 1994	GMAW	MS	?	T ; F : 0 - 12kHz	T : Vrms, Vpic F : CGS par bande
Saini 1998	GMAW	MS ou MD ?	Embarqué sur la torche – distance 0.38m	T ; F : 0 – 25kHz	T : Vrms, Vmoy, Vpic, <i>Zero-crossing rate</i> , Kurtosis, autres facteurs adimensionnés F : amplitude FFT
Wang 2001	PAW	MS	Embarqué sur la torche – distance non renseignée	T ; F : 0 – 250Hz	T : variance de l'amplitude du signal, F : DSP
Grad 2004	GMAW	PZ MS	PZ : sous substrat MS : Embarqué sur la torche – distance non renseignée	T ; F : 0 – 2kHz, 0 – 300 Hz	T : Vpic, Vmoy, Kurtosis F : DSP
Saad 2006	PAW	FFM	Embarqué sur la torche – distance 86mm	F : 0 – 15kHz	F : Amplitude FFT, DSP
Pal 2009	MIG	MS	Embarqué sur la torche – distance de 0.3 à 1.6 m	T ; F : 0 – 1kHz	T : Vrms, Kurtosis F : Amplitude FFT
Horvat 2010	GMAW	MS	Embarqué sur la torche – distance non renseignée	T	T : Vpic
GMAW : <i>Gaz Metal Active Welding</i>		PZ : microphone Piézoélectrique		T : domaine temporel	CGS : Centre de Gravité Spectral
MIG : <i>Metal Inert Gaz</i>		MS : Microphone Statique		F : domaine fréquentiel	DSP : Densité Spectrale de Puissance
PAW : <i>Plasma-Arc Welding</i>		MD : Microphone Dynamique			FFT : Transformée de Fourier
		FFS : <i>Free Field Microphone</i>			RMS : <i>Root Mean Square</i>

En conclusion de l'état de l'art, il a été démontré que le son renfermait une large quantité d'information sur les phénomènes apparaissant en cours de fabrication et offrait ainsi des perspectives de contrôle alternatives des procédés. Cependant les principaux verrous identifiés associés à ce type de mesure sont les suivants :

- la mise en œuvre d'une méthode de mesure sonore simple et peu coûteuse ;
- la difficulté d'identifier les informations contenues dans le spectre sonore temporel ou fréquentiel et de les relier aux caractéristiques du procédé ;
- le choix d'un descripteur sonore discriminant le *Stick Out*.

### III. Développement d'une méthode de mesure sonore

#### 1. Objectifs

Prenant en considération les verrous relevés dans la littérature ainsi que les objectifs de travail, les axes de recherche poursuivis dans ce chapitre sont les suivants :

- le développement d'une méthode de mesure dédiée aux procédés DED ;
- l'investigation de descripteurs fréquentiels corrélés avec le SO dans le cas du WAAM ;
- la proposition d'une stratégie de *monitoring* sonore dédiée au procédé WAAM, à partir du ou des descripteurs fréquentiels relevés ;
- la discussion de l'applicabilité de la stratégie de *monitoring* sonore proposée à d'autres procédés DED, tels que le LMD.

#### 2. Choix du capteur

Au regard de l'état de l'art, la technique de contrôle sonore du procédé via microphone statique ou dynamique paraît la plus pertinente pour les présents travaux, du point de vue du coût et de la facilité d'implémentation. Dans ces travaux, nous choisissons de proposer un montage non-embarqué, afin de limiter le nombre de capteurs sur la tête de dépôt et de garantir la mise en parallèle avec les autres boucles de contrôle développées par ailleurs dans les autres chapitres. Par ailleurs, sous réserve de l'indépendance de la mesure à la position du capteur par rapport à la zone de dépôt – démontrée dans la Section III.4.3 –, l'utilisation d'un montage non-embarqué permet une mise en œuvre flexible stratégie de *monitoring* sur un large panel de cas d'application.

Il convient de discuter le choix entre un microphone dynamique (MD) ou statique (MS) pour la prise de son. La différence entre les deux types de microphones réside dans le principe de transduction, c'est-à-dire la transformation de l'énergie acoustique en énergie électrique, portée soit par une bobine et un aimant dans le cas dynamique, soit par un condensateur dans le cas statique. Ces différences de fonctionnement ont un impact sur les performances des capteurs. Un comparatif des caractéristiques générales des microphones statiques et dynamiques est présenté en Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Comparaison des caractéristiques générales des microphones statique et dynamique.

	MD	MS
<b>Sensibilité</b>	<i>1mV/Pa à 5mV/Pa</i>	<i>10mV/Pa à 50mV/Pa</i>
<b>Bande passante</b>	<i>100Hz à 15kHz</i>	<i>20Hz à 20kHz</i>
<b>Prix</b>	<i>Peu couteux à couteux</i>	<i>Très couteux</i>
<b>Source d'alimentation</b>	<i>Pas nécessaire</i>	<i>Nécessaire</i>
<b>Robustesse</b>	<i>Très robuste</i>	<i>Fragile</i>

Dans la littérature, un microphone électrostatique est souvent privilégié, pour ses meilleures performances en termes de fidélité et de sensibilité [Grad 2004, Pal 2009, Horvat 2011]. Dans notre application, les niveaux de pression acoustique attendus étant très élevés, nous choisissons de privilégier un microphone à faible sensibilité pour éviter une saturation de la tension en sortie. Sur ce premier point, le MD paraît plus approprié. De plus, les critères de prix, de robustesse et de nécessité de source d'alimentation rendent le MD plus pertinent au regard de nos objectifs de proposer une méthode de mesure flexible et peu couteuse. Au vu du caractère exploratoire de l'étude, les meilleures performances de sensibilité d'un MS ne sont pas recherchées en première approche. Ainsi, dans ces travaux, un microphone électrodynamique est choisi pour son faible coût et sa robustesse et afin de démontrer le potentiel de contrôle sonore.

Dans le prolongement du type de microphone, sa directivité est une caractéristique importante à discuter. La directivité cardioïde, illustrée en Figure 4-6, paraît la plus adaptée à nos développements. D'une part, elle permet de capter la source sonore principale provenant de la fabrication, dans un champ de 60° devant le microphone, ce qui permet de capter convenablement les sons issus de la fabrication pour des pièces massives avec de larges déplacements du robot. D'autre part, elle atténue les sons alentours, ce qui, couplée à la sensibilité moyenne d'un MD, permet de limiter les éventuelles perturbations provenant de réverbérations sur des parois ou d'autres sources sonores parasites – moteurs, néons, ou autres activités hors environnement de fabrication. L'utilisation d'un microphone directionnel ou super-cardioïde peut également être envisagée pour l'application, mais réduira sans doute l'étendu du champ de mesure et donc la zone d'application de la méthode de *monitoring* correspondante.

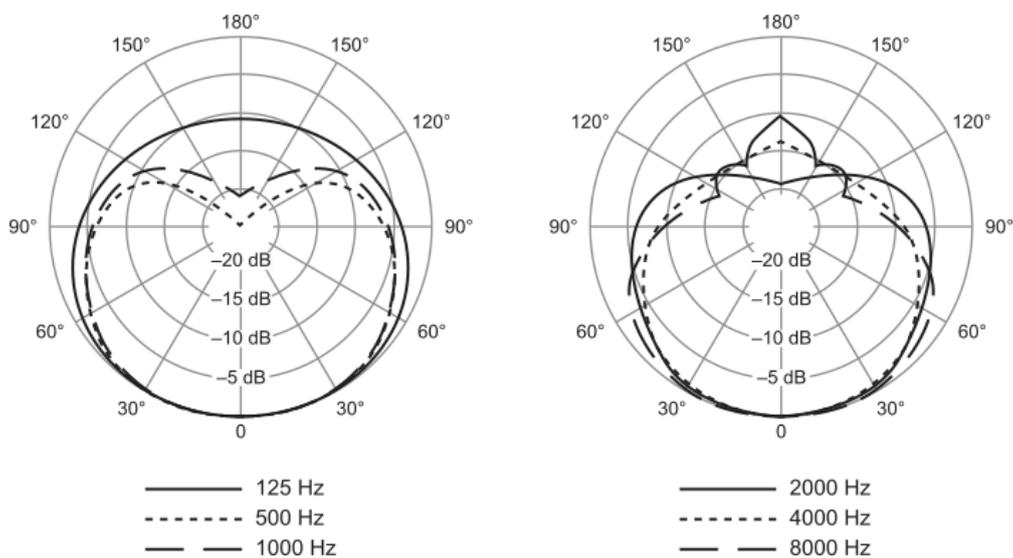


Figure 4-6 : exemple typique de diagramme polaire de directivité cardioïde.

### 3. Montage expérimental et post-traitement

Le montage expérimental pour le contrôle sonore du procédé WAAM est illustré en Figure 4-7. La chaîne d'acquisition est composée d'un pré-amplificateur 2 canaux CANFORD, d'un microphone dynamique cardioïde Shure SM 57 et d'une carte son VX pocket V2. Les caractéristiques techniques du microphone sont reportées en Tableau 4-3. Conformément aux objectifs fixés dans le cadre de l'étude et à la directivité du microphone, ce dernier est placé à une distance de 900mm, orienté vers la zone de dépôt du robot.

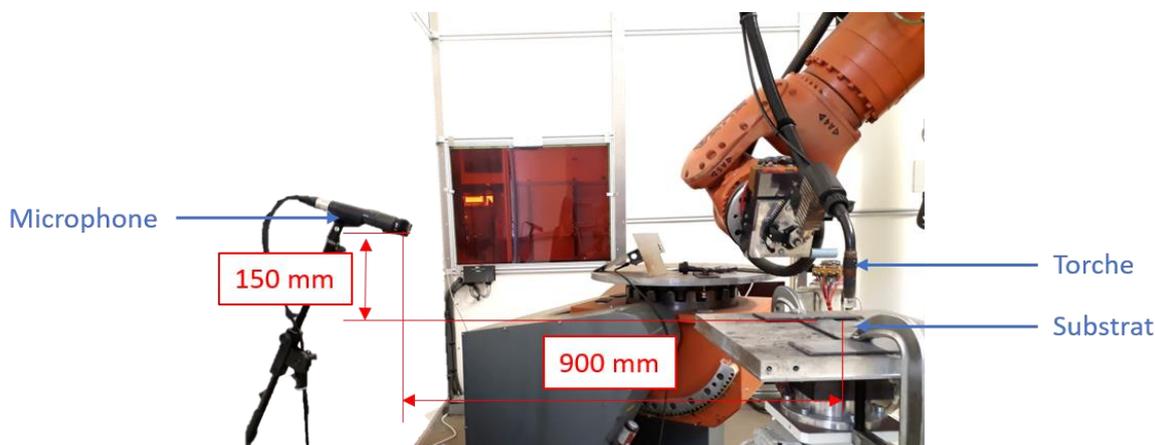


Figure 4-7 : montage expérimental pour le monitoring sonore du procédé WAAM.

Tableau 4-3 : Caractéristiques du microphone dynamique SM 57.

Directivité	Cardioïde
Sensibilité (valeurs pour un signal à 1kHz)	-56,0 dBV/Pa ou 1,6 mV/Pa
Bande passante	40 – 15 000Hz

La majorité des descripteurs temporels relevés dans la littérature sont basés sur l'amplitude du signal, qui dépend de la distance entre le capteur et la zone de dépôt [Saini 1998]. De par le choix d'un montage du capteur non-embarqué dans l'environnement de fabrication, cette distance n'est a priori pas maîtrisée et peut varier considérablement en cours de fabrication, notamment dans le cas de grandes pièces. Ainsi, afin de garantir la robustesse de la mesure sonore, nous avons choisi de traiter les données sonores dans le domaine fréquentiel.

La prise de mesure et le traitement des données sont respectivement effectués avec les logiciels Audacity et Matlab. Les variations de pression induites par le procédé en cours de fabrication sont enregistrées cordon par cordon. Pour chaque cordon, les données in-situ sont traitées et analysées dans le domaine fréquentiel, via un code développé dans le cadre de cette thèse. La Transformée de Fourier (FFT) du signal sonore est calculée avec la fonction « `fft` » de Matlab, mise en œuvre avec une fenêtre rectangulaire, une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz et un nombre de points égal à la taille du signal considéré, soit autour de 300 000 points. Dans ces conditions, la résolution en fréquence de la FFT est aux alentours de 0,06 Hz/point et le temps de post-traitement des données est de l'ordre de 0,5s, ce qui est compatible avec une application en temps réel pour le procédé WAAM. La section suivante va rappeler les éléments d'obtention de la FFT et détailler la mise au point de la mesure.

## 4. Qualification de la mesure

Afin de suivre les analyses menées dans le cadre de ces travaux, cette partie s'attache à rappeler les principaux éléments de traitement du signal relatifs à la Transformée de Fourier. Ensuite, il conviendra de qualifier les performances de la mesure, notamment en termes de répétabilité et de sensibilité à la position du microphone, afin de valider la fiabilité des mesures avec le microphone placé fixe loin de la zone de dépôt.

### 4.1. Rappel sur la Transformée de Fourier

Afin d'étudier le spectre fréquentiel des signaux sonores, il convient d'utiliser la Transformée de Fourier discrète, puisque les signaux enregistrés sont échantillonnés à la fréquence d'acquisition du capteur [Lecomte 2001]. Nous définissons la Transformée de Fourier (FFT) discrète d'une fonction  $f$  la fonction  $F$  telle que :

$$F(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{-\frac{2i\pi\omega}{N}t} f(t)$$

Avec  $f$  fonction définie dans le domaine temporel,

$F$  la Transformée de Fourier de  $f$ , définie dans le domaine fréquentiel,

$\omega$  pulsation en  $s^{-1}$ ,

$t$  le temps en s,

et  $N$  le nombre de points d'échantillonnage du signal.

A partir de la FFT, on étudie couramment le spectre d'amplitude  $|F(\omega)|$  ainsi que son spectre de phase  $\arg(F(\omega))$  [Gasquet 1996]. En première approche, les travaux vont se focaliser sur le spectre d'amplitude, afin d'identifier les fréquences sollicitées et rechercher un descripteur fréquentiel dans l'optique d'une stratégie de *monitoring*. La méthode d'analyse de la Transformée de Fourier choisie dans ces travaux est illustrée en Figure 4-8, pour le cas d'un signal périodique. La Figure 4-8 montre que la Transformée de Fourier (FFT) permet notamment de quantifier l'énergie moyenne par fréquence sur une fenêtre de temps finie. Il convient de noter que dans le cas de notre application, les signaux seront sans doute non-périodiques. Les spectres sonores correspondants seront plus riches et complexes que celui représenté ici.

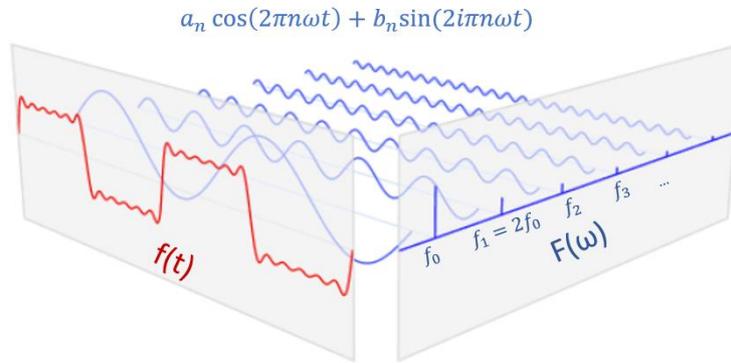


Figure 4-8 : schématisation du principe de Transformée de Fourier discrète dans le cas d'un signal périodique

#### 4.2. Répétabilité de la mesure

La répétabilité de la mesure a été testée sur quatre cordons identiques, fabriqués dans les conditions opératoires de référence, présentées en Tableau 4-4. Parmi ces quatre cordons, trois ont été fabriqués à la suite et un le lendemain après démontage du microphone dynamique.

Tableau 4-4 : paramètres opératoires utilisés pour les travaux de monitoring sonore appliqués au procédé WAAM.

<b>P</b>	3500 W
<b>WFS</b>	7,4 mm/min
<b>TS</b>	700 mm/min
<b>Débit de gaz protecteur</b>	16 L/min
<b>Stick Out</b>	13 mm

Les enregistrements sonores des dépôts sont analysés dans le domaine fréquentiel. En attendant l'analyse complète du spectre fréquentiel, présentée dans la Section VI.2, nous présentons l'étude de répétabilité sur deux pics d'intérêt, à 90 et 285 Hz. Pour ces deux pics, les fréquences relevées sont reportées en Tableau 4-5. A partir des résultats du Tableau 4-5, nous notons une très faible variabilité des fréquences mesurées à travers les valeurs d'écart types (STD). Ainsi, nous pouvons conclure sur la répétabilité de la mesure en termes de fréquence. La méthode de mesure proposée permet donc d'estimer la fréquence des pics considérés avec une incertitude de l'ordre de 0,30 Hz

Tableau 4-5 : résultats de l'étude de répétabilité des fréquences mesurées.

	Répétabilité directe			Répétabilité indirecte	Moyenne	STD
	Cordon 1	Cordon 2	Cordon 3	Cordon 4		
Fréquence pic 1 (Hz)	90,42	89,99	89,99	90,64	90,26	0,32
Fréquence pic 2 (Hz)	285,2	285,2	285	284,6	285,00	0,28

#### 4.3. Etude de sensibilité à la position du microphone

Afin d'évaluer l'influence du montage sur les données mesurées, les signaux sonores pour trois cordons identiques recueillis par le MD dans trois positions différentes ont été comparés. Les différentes positions du MD sont illustrées Figure 4-9. La configuration de référence, retenue dans les autres essais, est illustrée Figure 4-9.a ; en Figure 4-9.b, le MD garde la même distance horizontale depuis la zone de dépôt, mais a été élevé par rapport à la configuration de référence ; enfin, la Figure 4-9.c illustre une position aléatoire du MD. Dans le prolongement de l'étude précédente, les fréquences relevées pour deux pics d'intérêt – 90 Hz et 285 Hz – sont présentées en Tableau 4-6.

Tableau 4-6 : résultats de l'étude de l'influence de la position du microphone dynamique.

	Position de référence	Position haute	Position aléatoire	Moyenne	STD
Fréquence pic 1 (Hz)	90,42	90,69	90,82	90,64	0,20
Fréquence pic 2 (Hz)	285,2	285,2	285,3	285,23	0,06

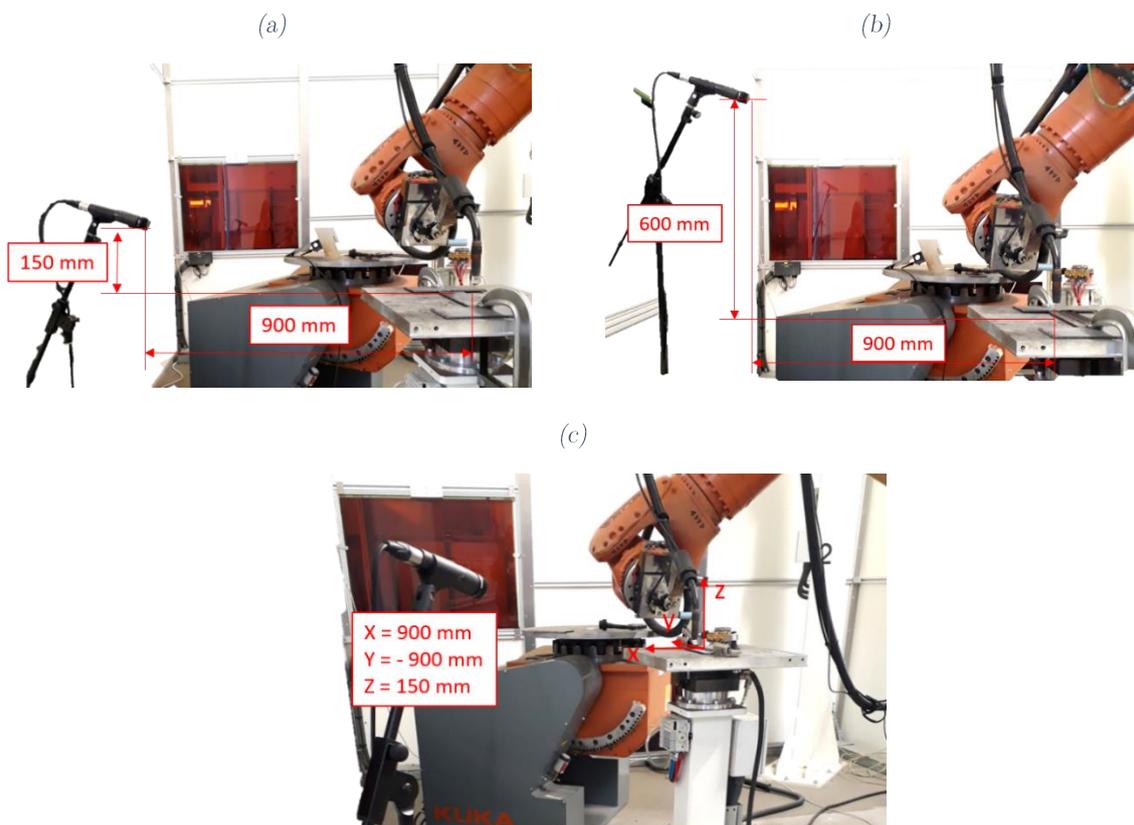


Figure 4-9 : illustration des différentes positions de microphone dynamique testées. (a) Position de référence, (b) position haute, (c) position aléatoire.

En Tableau 4-6, nous observons des résultats similaires à ceux de l'étude de répétabilité. Pour un même pic, l'écart entre les fréquences relevées est de 0,20 Hz. Nous pouvons donc conclure que pour les pics considérés, les fréquences mesurées en cours de dépôt ne sont pas influencées par la position du microphone dynamique.

## 5. Bilan

Dans cette section, une méthode de mesure sonore avec un microphone dynamique non-embarqué a été proposée. Les différentes études de répétabilité et de sensibilité réalisées ont permis de conclure sur la qualité des mesures sonores recueillies. L'indépendance des mesures à la position du capteur constitue un avantage majeur pour la mise en œuvre de la méthode : d'une part, le microphone peut être placé n'importe où dans l'environnement de travail, ce qui simplifie le développement d'un montage expérimental ; d'autre part, elle ouvre la voie vers une application de la méthode de mesure sur une large gamme de tailles de composants. A partir de cette méthode de mesure, la signature acoustique du procédé WAAM va être étudiée pour en extraire des descripteurs fréquentiels pertinents à des fins de contrôle sonore.

## IV. Application de la mesure sonore à la caractérisation de la signature acoustique du procédé WAAM

Les différentes études menées pour qualifier les performances du capteur ont permis de valider la pertinence et de montrer le potentiel du contrôle non-invasif lié à la méthode de mesure proposée. Cette méthode de mesure est maintenant mise en œuvre pour caractériser la signature acoustique du procédé WAAM, dans l'optique de déterminer les descripteurs fréquentiels pertinents pour un contrôle en temps réel.

Dans cette section, la signature acoustique du mode de dépôt *Cold Metal Transfer* (CMT) du procédé WAAM, que nous noterons par la suite WAAM-CMT, est étudiée dans le cas d'un dépôt d'acier Duplex. L'objectif est d'identifier les caractéristiques fréquentielles du spectre sonore et de les relier au fonctionnement du mode CMT, dans l'optique d'identifier des descripteurs pertinents à considérer pour le *monitoring* du *Stick Out*.

### 1. Principe du mode WAAM-CMT

Dans cette section, le principe du mode WAAM-CMT est brièvement présenté à partir de la littérature dédiée [Pickin 2006, Williams 2016]. Les différentes étapes du mode CMT sont décrites ci-après et illustrées en Figure 4-10 :

- 1) création d'un arc électrique entre le fil et le substrat, accompagné d'une avancée du fil. L'arc électrique va générer une augmentation de température au sein du fil ;
- 2) contact du fil sur le substrat, qui produit un court-circuit et éteint l'arc électrique. Ce court-circuit s'accompagne de la création d'une goutte de métal chaud ;
- 3) recul du fil pour détacher la goutte ;
- 4) reprise de l'étape 1 au pas de déplacement du robot.

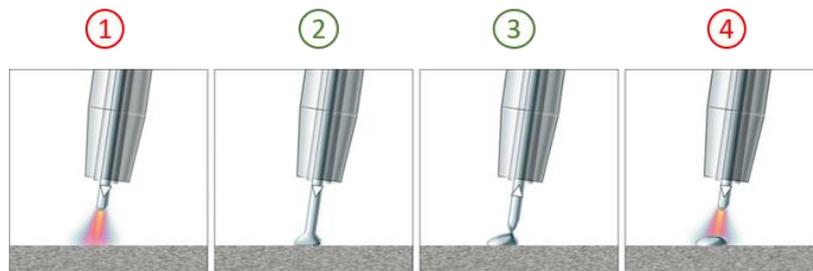


Figure 4-10 : descriptions des différentes phases de fonctionnement du mode CMT.

## 2. Analyse du spectre sonore issu d'un dépôt de cordon simple

Dans cette étude, nous considérons les mesures sonores enregistrées lors du dépôt d'un cordon simple en acier duplex mené avec le procédé WAAM-CMT. Ce cordon est de 100 mm de longueur et déposé avec les conditions de dépôt de référence – voir Tableau 4-4 – sur un substrat préalablement sablé afin de garantir des conditions de dépôt optimales. Les spectres sonores temporel et fréquentiel résultant des mesures sonores *in-situ* pour ce cas d'application sont illustrés en Figure 4-11.

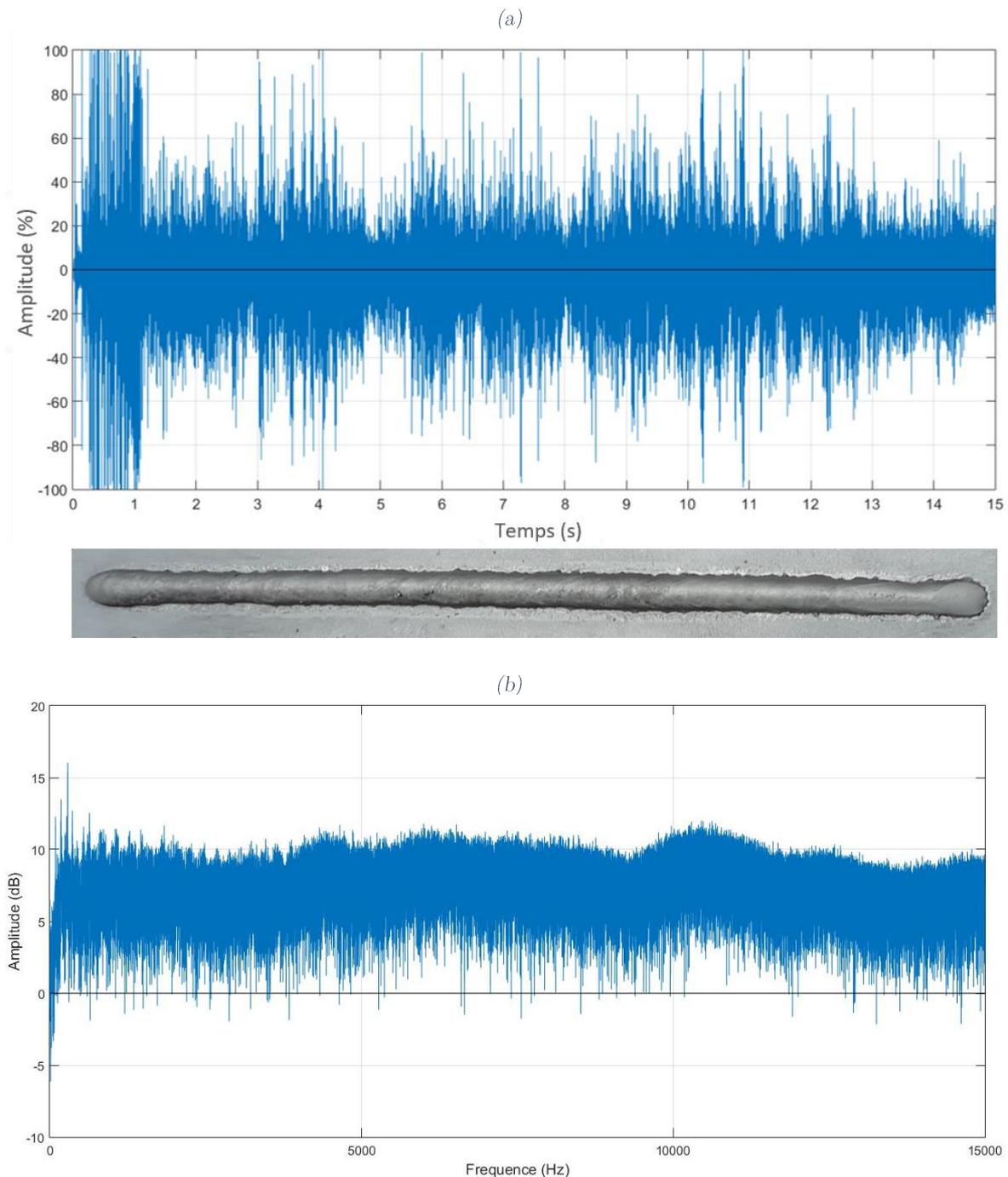


Figure 4-11 : (a) signal temporel brut enregistré en cours de dépôt WAAM-CMT et (b) FFT associée.

Tout d'abord, en Figure 4-11.a, nous pouvons observer que le spectre temporel présente une succession de nombreux pics, avec des amplitudes variables, tout au long du dépôt. Nous remarquons une prédominance de pics à forte amplitude pour le début de fabrication. Ces pics sont associés à la phase d'accroche, présentant des paramètres de soudage augmentés afin de faciliter la pénétration du cordon dans le substrat. Concernant la Figure 4-11.b, le spectre fréquentiel est présenté sur l'ensemble de la plage de mesure du microphone dynamique utilisé. En basse fréquence, soit en-dessous de 500 Hz, le spectre fréquentiel présente plusieurs pics d'amplitudes supérieures à 10 dB. Pour les fréquences supérieures à 500 Hz, nous pouvons noter une amplitude moyenne d'environ 7 dB.

Les contributions sonores du procédé étant principalement localisées en basses fréquences [Wang 2001, Grad 2004], nous choisissons de concentrer l'étude de la FFT sur la plage de fréquence entre 0 et 300 Hz. Cette réduction de la plage de données permet d'optimiser le traitement des données dans l'optique d'un contrôle en temps réel. La tranche de FFT correspondante est illustrée en Figure 4-12. Plusieurs pics de fréquences sont relevés dans le spectre, notamment :

- un pic (A) à 58,3 Hz ;
- deux pics (B) et (C) à 90,7 Hz et 181,1 Hz, qui sont respectivement la fondamentale, l'harmonique de rang 2 d'une série harmonique ;
- un pic (D) à 285,2 Hz.

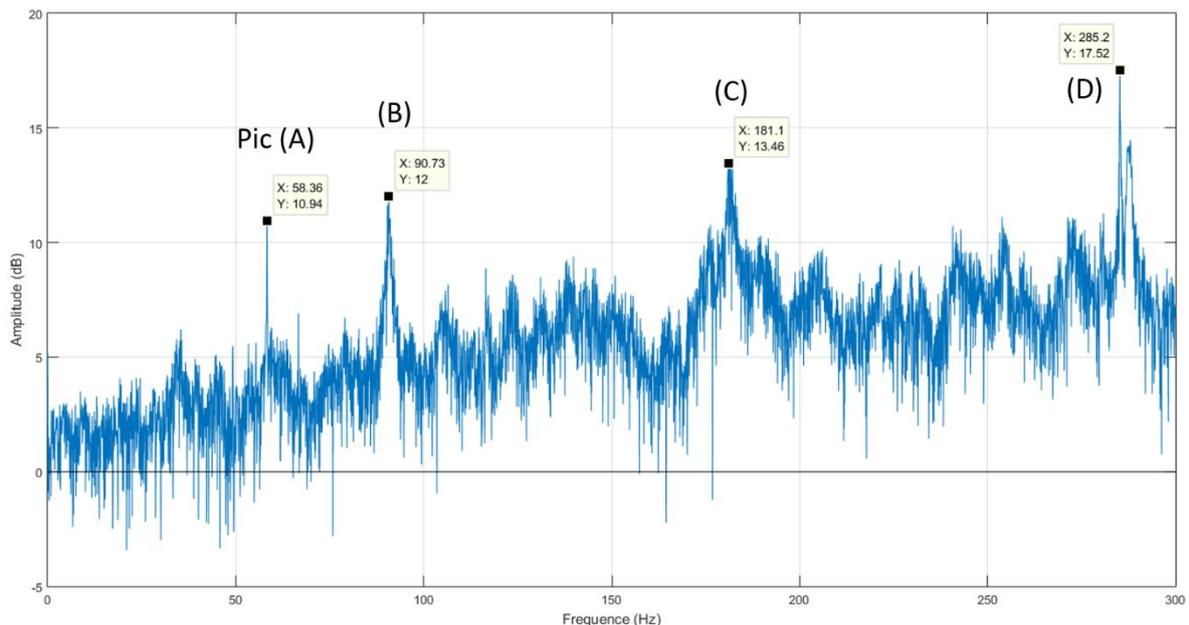


Figure 4-12 : zoom sur les basses fréquences de la FFT d'un signal enregistré lors d'un dépôt WAAM-CMT de l'acier duplex en conditions de dépôt de référence.

Parmi les pics identifiés, le pic (A) est associé à la contribution sonore des différents éléments motorisés de l'environnement de fabrication. Nous faisons donc l'hypothèse que les pics (B), (C) et (D) caractérisent la signature acoustique du procédé WAAM-CMT pour le cas d'application étudié. Afin de valider cette hypothèse, la section suivante va s'attacher à identifier la source sonore de chacun de ces pics, dans l'optique d'identifier un descripteur fréquentiel pertinent pour réaliser un contrôle sonore du procédé.

### 3. Identification des fréquences relevées dans le spectre fréquentiel

#### 3.1. *Fréquence liée au débit de gaz protecteur*

Afin d'aider à l'identification des fréquences relevées en Figure 4-12, le procédé est enregistré en condition de « pré-gaz ». Cette condition consiste à appliquer le débit de gaz protecteur sans déposer de matière, dans le but de préparer l'atmosphère dans la zone de dépôt avant le déclenchement de l'arc. Cette étape précède systématiquement le début des dépôts et dure généralement 1,5 s.

La FFT du signal enregistré en condition de « pré-gaz » est superposée à celle du signal du dépôt en Figure 4-13. La FFT du « pré-gaz » ne comporte qu'un pic de fréquence à 285,9 Hz, qui vient se superposer au pic correspondant dans le spectre fréquentiel complet. Cette étude permet donc de relier le pic (D) relevé dans la Figure 4-12 au débit de gaz en cours dépôt.

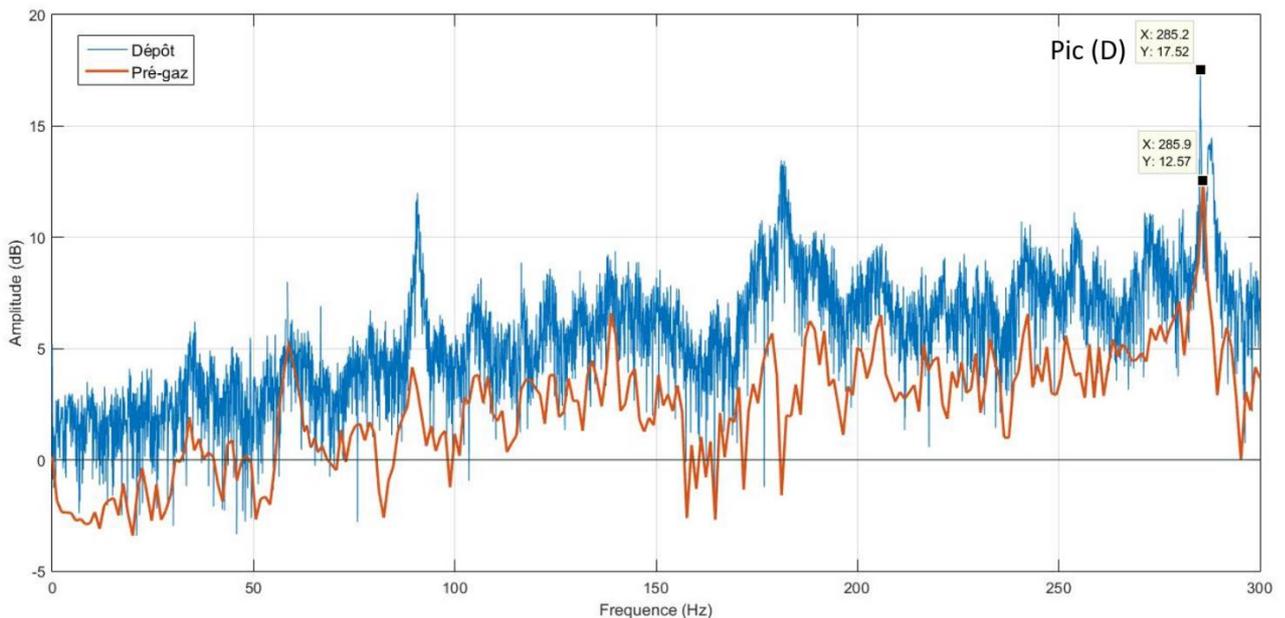


Figure 4-13 : comparaison des FFT des enregistrements en conditions normales de dépôt ainsi qu'en configuration de « pré-gaz ».

### 3.2. Série harmonique liée à la fréquence de court-circuit

Nous faisons l'hypothèse que la fréquence fondamentale de la série harmonique – soit le pic (B) de Figure 4-12 – est corrélée à la fréquence de court-circuit du procédé WAAM-CMT. Afin de valider cette hypothèse, nous souhaitons identifier la fréquence de court-circuit à partir du spectre sonore temporel, selon la démarche proposée par Horvat *et. al* [Horvat 2011]. En ce sens, le spectre sonore est étudié localement afin de mettre en évidence les cycles de court-circuit. En particulier, la Figure 4-14 présente un cycle de court-circuit de l'arc.

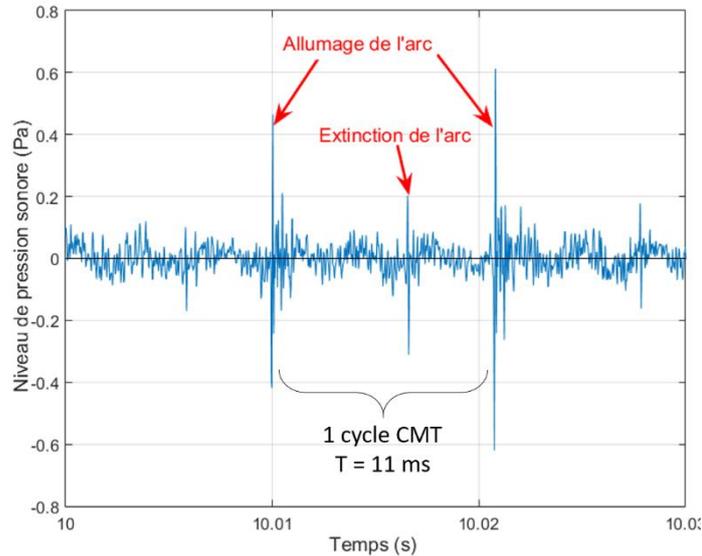


Figure 4-14 : zoom sur 100ms du signal temporel brut enregistré en cours de dépôt WAAM-CMT.

En Figure 4-14, nous distinguons notamment deux pics de pression liés à l'allumage et un lié à l'extinction de l'arc [Horvat 2011]. La fréquence de court-circuit peut être identifiée à partir de la période entre deux pics de même nature. Pour notre application, elle est estimée à 90,9 Hz, ce qui correspond à la fréquence du pic relevé dans la FFT. Ainsi, la série harmonique relevée dans la FFT est la contribution sonore des courts-circuits de l'arc électrique en cours de dépôt.

## 4. Bilan

Les travaux de cette section permettent de caractériser la signature acoustique du mode WAAM-CMT dans la plage de 0-300 Hz. Les différentes fréquences identifiées sont reportées en Figure 4-15.

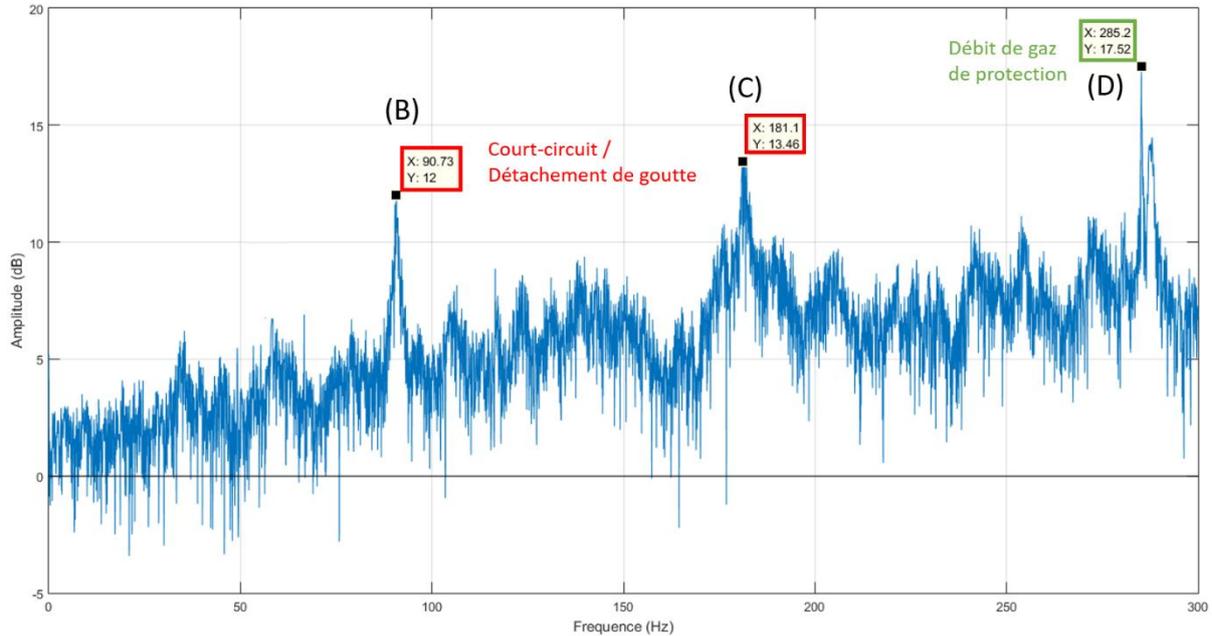


Figure 4-15 : caractérisation de la signature acoustique du mode CMT dans le cas d'étude considéré.

L'identification de la contribution du débit de gaz dans le spectre ouvre la voie vers de nouvelles techniques de contrôle du procédé. En ce sens, des tests complémentaires pourraient être menés afin de déterminer si le pic identifié permet de discriminer différentes consignes de débit de gaz, par exemple à travers des variations de fréquence ou d'amplitude. Dans la suite de ces travaux, cette piste ne sera pas étudiée au profit de l'investigation d'une méthode de contrôle du *Stick Out*.

La fréquence du pic (B) étant corrélée à la fréquence de court-circuit du procédé WAAM-CMT, elle apparaît comme un descripteur sonore pertinent pour développer une stratégie de *monitoring* sonore. En effet, il convient de noter que la fréquence de court-circuit régit intrinsèquement l'action d'avance-recul du fil et le détachement des gouttes de métal [Pickin 2006, Cai 2018]. Par ailleurs, un effet de la longueur d'arc sur la fréquence d'avance-recul du fil ayant été mis en évidence par Cai *et. al* [Cai 2018], nous souhaitons utiliser ce descripteur fréquentiel pour développer une stratégie de *monitoring* du *Stick Out*, ce qui fera l'objet de la section suivante.

## V. Proposition d'une stratégie de *monitoring* du *Stick Out*

### 1. Approche de *monitoring* sonore visée

L'approche générale de *monitoring* sonore proposée dans ces travaux est illustrée Figure 4-16. Un microphone, placé fixe dans l'enceinte de dépôt, enregistre les ondes sonores produites en cours de fabrication. Le spectre sonore est analysé dans le domaine fréquentiel, afin d'en extraire les quantités physiques d'intérêt qui informeront de l'état du procédé et de la qualité de la pièce – caractéristiques géométriques, éléments de santé matière etc. Ce traitement peut s'effectuer en temps réel pour adapter la stratégie de fabrication en cours de dépôt, ou entre chaque couche, avec dans ce cas, un ajustement des paramètres de fabrication pour la couche suivante.

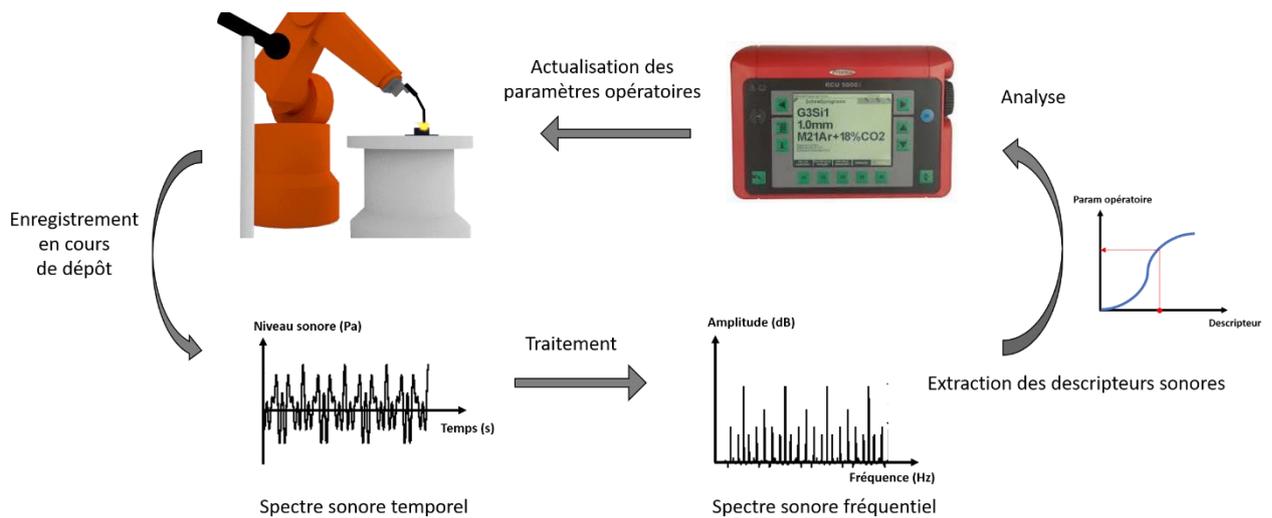


Figure 4-16 : approche de monitoring sonore proposée dans ces travaux.

Dans ces travaux, une stratégie de *monitoring* sonore permettant de contrôler le *Stick Out* d'une couche à l'autre est présentée. En particulier, nous proposons d'estimer le SO moyen de la couche grâce à la position du pic fréquentiel contenu dans la FFT du signal sonore enregistré en court de dépôt. Cette méthode de contrôle ne permet a priori pas de rendre compte d'éventuelles variations locales en cours de dépôt. En effet, la FFT quantifie l'énergie moyenne par fréquence sur la totalité du signal sonore, enregistré ici lors du dépôt d'une couche entière. Ainsi, les variations locales apparaissant en cours de dépôt d'une couche sont susceptibles de ne pas impacter la position du pic d'intérêt.

La suite de cette section va présenter tout d'abord un modèle de contrôle du *Stick Out* développé à partir du descripteur fréquentiel sélectionné, puis une stratégie de *monitoring* associée. Enfin, l'applicabilité de la stratégie de *monitoring* sonore proposée au procédé LMD sera discutée.

## 2. Modèle de contrôle du *Stick Out*

### 2.1. *Développements sur cordons simples*

Le développement du modèle de contrôle sonore est basé sur l'étude de trois séries de six cordons simples de 150 mm, déposés avec différents *Stick Out*. Le Tableau 4-7 présente les paramètres opératoires utilisés pour l'ensemble des dépôts de cette étude et les valeurs de *SO* testées sont listées en Tableau 4-8. A titre d'exemple, les configurations de dépôt à *SO* 13 mm et 33 mm sont illustrées en Figure 4-17. Le *Stick Out* de 13 mm est considéré comme valeur de référence par le fournisseur du poste de soudage.

Tableau 4-7 : paramètres opératoires utilisés pour le développement du modèle de contrôle sonore.

P	3760 W
WFS	7,4 mm/min
TS	700 mm/min
Débit de gaz protecteur	16 L/min

Tableau 4-8 : Récapitulation des différentes valeurs de *Stick Out* sélectionnées pour développer le modèle de contrôle sonore.

Valeur de <i>SO</i> (mm)	Caractéristique
8	Réf - 5mm
13	Référence
18	Réf + 5mm
23	Réf + 10mm
28	Réf + 15mm
33	Réf + 20mm

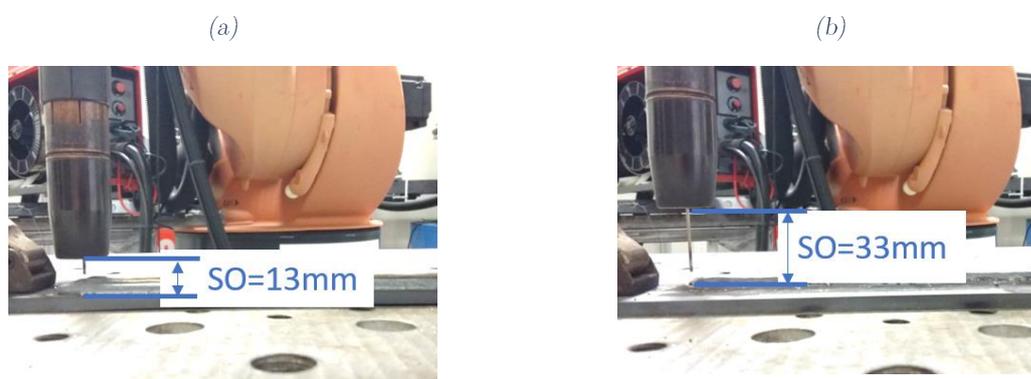


Figure 4-17 : illustration de deux sticks out testés pour développer le modèle de contrôle sonore.

(a) *SO* de 13 mm, (b) *SO* de 33 mm.

L'évolution du descripteur fréquentiel en fonction du *Stick Out* est présentée en Figure 4-18. Il convient de constater que la fréquence du descripteur diminue linéairement avec l'augmentation du *Stick Out*, selon le modèle décrit dans l'Equation 4-1.

$$f = -0,588 * SO + 98,2$$

Equation 4-1

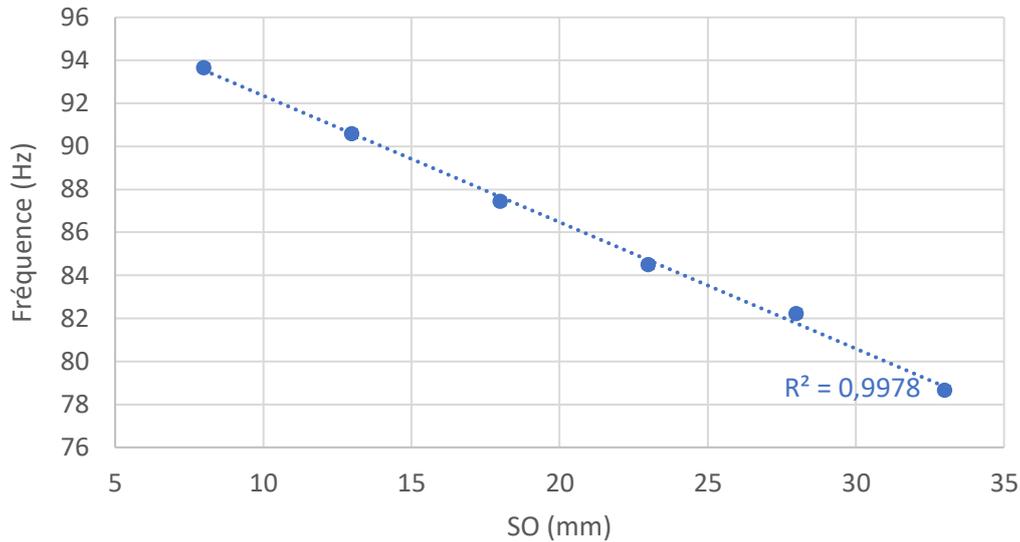


Figure 4-18 : modèle reliant le descripteur sonore fréquentiel au Stick Out.

En première approche, nous avons proposé un modèle linéaire pour relier le SO à un descripteur fréquentiel issu des mesures sonores. Le modèle ayant été développé sur des cordons simples, il convient maintenant d'étudier sa validité sur d'autres cas de fabrication, notamment en paroi simple.

### 2.2. Extension à la géométrie monocordon

Des mesures en cours de fabrication d'un mur monocordon de 35 couches ont été réalisées afin de tester la validité du modèle de contrôle sonore précédemment proposé. Le mur de 150 mm de long est fabriqué sur un substrat de 3 mm d'épaisseur. Le mur final est illustré en Figure 4-19. Afin de reproduire les valeurs de *Stick Out* du modèle, un incrément vertical du robot a été programmé à  $\Delta z_{\text{robot}}=3$  mm, délibérément supérieur à la hauteur de couche déposée avec les paramètres opératoires sélectionnés - voir Tableau 4-7 -, qui est habituellement de 1,8 mm.



Figure 4-19 : mur monocordon fabriqué pour valider le modèle de contrôle sonore.

Les signaux sonores des dépôts de chaque couche sont enregistrés et analysés après la fabrication. Pour chaque couche du mur, le SO a été calculé à partir de la position du robot connue et de la hauteur du mur, mesurée en cours de fabrication. Ainsi, les fréquences mesurées à chaque couche sont reliées au SO correspondant et confrontées à l'abaque précédent en Figure 4-20.

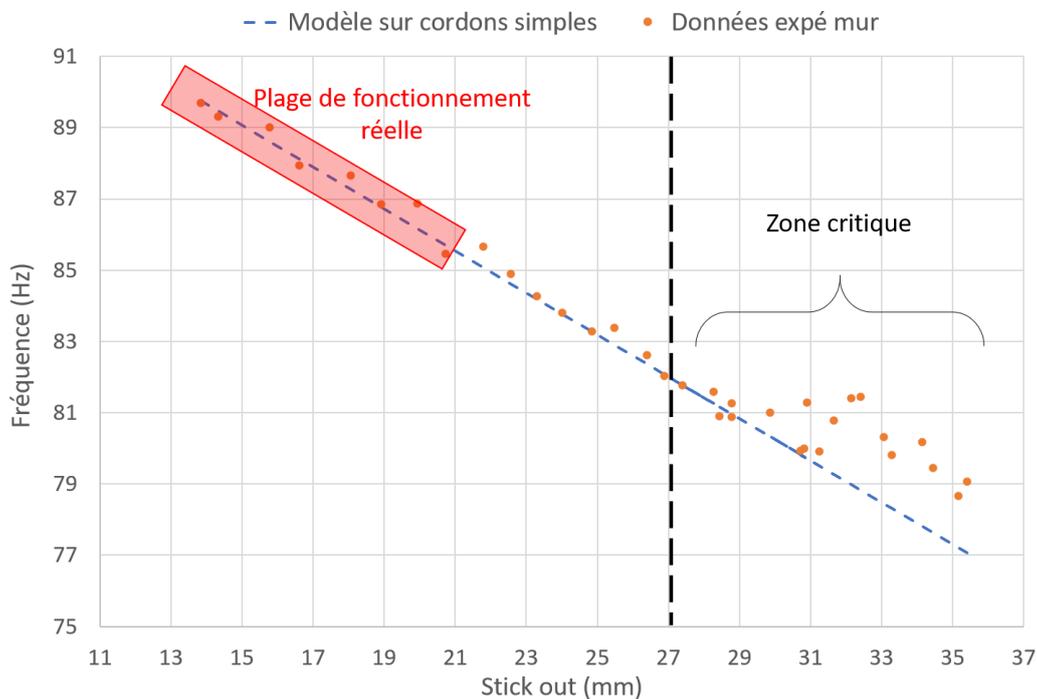


Figure 4-20 : comparaison du modèle de contrôle du SO avec des mesures sonores pour un mur monocordon.

En Figure 4-20, pour les valeurs de SO inférieures à 27 mm, les mesures suivent la même évolution que le modèle développé sur cordons simples. A partir d'une valeur de SO de 27 mm environ, les mesures s'écartent du modèle. Pour ces valeurs critiques de SO, l'augmentation excessive de la distance de travail va générer des longueurs d'arc que les asservissements internes au générateur de soudage peinent à contrôler, ce qui va favoriser l'apparition d'instabilités en cours de fabrication [Pal 2009]. Dans la littérature, des SO inférieurs à 20 mm sont généralement employés pour fabriquer des composants en acier [Venturini 2016, Ogino 2018, Martina 2019]. Ainsi, le modèle est valable dans la plage de fonctionnement du procédé visée en situation réelle de fabrication.

En conclusion, le modèle proposé, initialement développé sur des cordons simples, peut être appliqué sans ajustement préalable pour contrôler le *Stick Out* pour des fabrications de pièces à paroi monocordon en acier duplex. La démarche proposée peut être appliquée de manière identique pour construire des modèles de contrôle du *Stick Out* relatifs à d'autres matériaux et d'autres plages de fonctionnement. En perspective de ces travaux, il serait intéressant d'investiguer la validité du modèle sur des géométries multicordons.

### 3. Proposition d'une stratégie de *monitoring* sonore pour le procédé WAAM

A partir des précédents développements de modèle de contrôle du *Stick Out* par des moyens fréquentiels, nous proposons la stratégie de *monitoring* sonore basée sur une boucle de contrôle détaillée en Tableau 4-9. Cette boucle de contrôle est basée sur la considération d'une fréquence contenue dans le spectre sonore, identifiée à la fréquence de dépose de goutte et corrélée au *Stick Out*. En sortie de la boucle de contrôle, nous proposons d'agir sur la hauteur de l'effecteur afin d'agir sur le SO sans modifier les autres paramètres opératoires régissant le procédé. Par ce choix, il convient de noter que la boucle de contrôle développée ne rentre a priori pas en conflit avec les deux précédentes boucles de contrôle thermique et géométrique développées aux chapitres précédents.

Tableau 4-9 : boucle de contrôle sonore proposée dans ces travaux.

<b>Descripteur mesuré en entrée</b>	Fréquence
<b>Quantité physique associée au descripteur</b>	<i>Stick Out</i>
<b>Paramètre opératoire corrigé en sortie</b>	Hauteur de l'effecteur

A partir de la boucle de contrôle détaillée précédemment, une stratégie de *monitoring* sonore est illustrée en Figure 4-21. Dans cette stratégie, la mesure sonore est menée lors du dépôt de chaque couche. En phase de refroidissement, la fréquence d'intérêt est extraite de la Transformée de Fourier et transformée en valeur de *Stick Out* réelle via le modèle de contrôle précédemment développé. En fonction de l'écart entre le SO réel et la valeur de référence, la position de l'effecteur est réajustée avant le départ de la couche suivante de manière à garantir un SO moyen constant d'une couche à l'autre. Dans cette stratégie de *monitoring*, les variations de SO au sein d'une couche ne sont pas considérées.

Dans le but de définir l'écart de SO admissible, nécessaire à la mise en œuvre de la stratégie de *monitoring* détaillée précédemment, il serait pertinent de considérer l'effet du SO sur les caractéristiques géométriques du cordon. En ce sens, l'abaque illustré en Figure 4-22, construit à partir des cordons fabriqués en Section V.2.1, apporterait des éléments de définition de l'écart admissible en fonction de la tolérance géométrique des cordons. Cet écart admissible serait ensuite traduit en termes de variations de fréquences admissibles autour de la fréquence de référence correspondante au SO optimal.

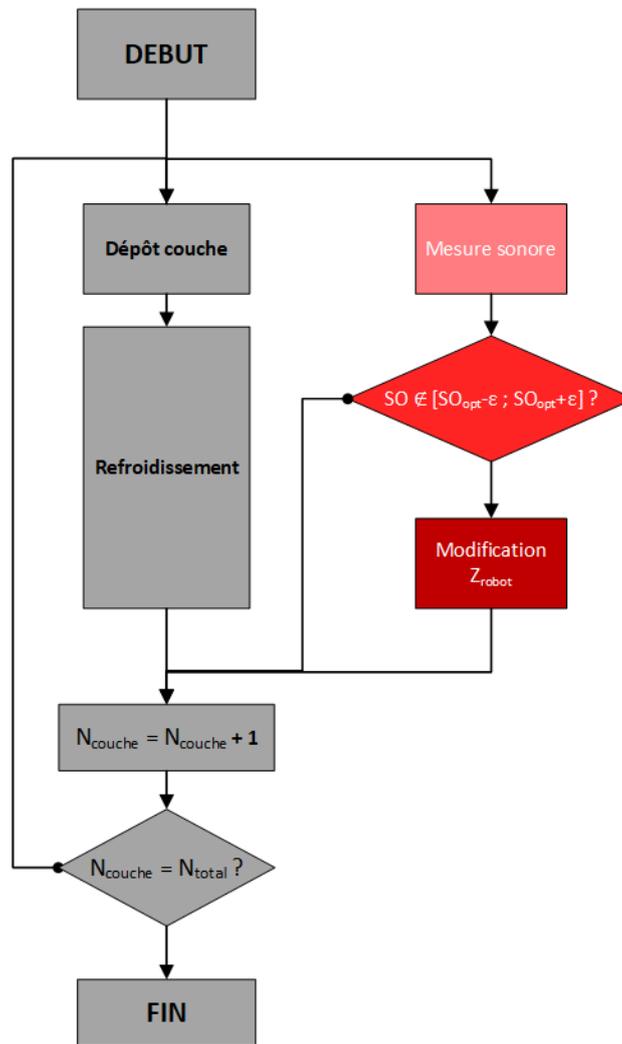


Figure 4-21 : algorithme de la stratégie de monitoring sonore proposée dans ces travaux.

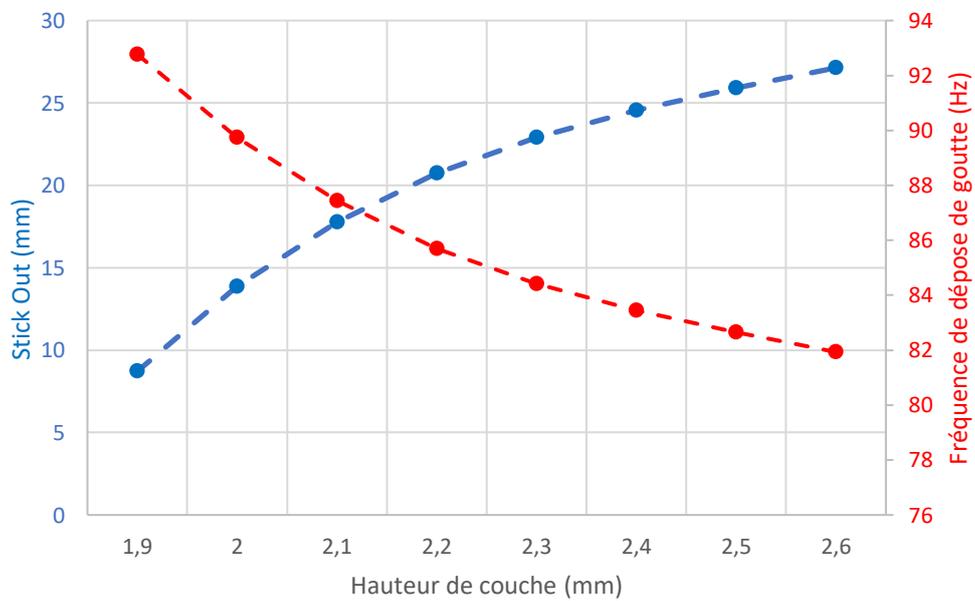


Figure 4-22 : abaque reliant hauteur de couche avec le SO et le descripteur fréquentiel.

#### 4. Discussion de l'applicabilité de la méthode au procédé LMD

Conformément à l'objectif des travaux de thèse de proposer des méthodes de *monitoring* applicables à l'ensemble des technologies DED, il convient de discuter l'applicabilité de la méthode de contrôle sonore développée ici au procédé LMD. De par les différences importantes de technologie, la méthode actuelle n'est sans doute pas transposable directement au LMD, car les contributions sonores du laser et du flux de poudre sont vraisemblablement différentes que celles l'arc électrique et l'action mécanique du fil identifiées ici. De plus, les bruits de la machine – notamment des éléments moteurs et groupe de refroidissement du laser – semblent a priori prédominants par rapport aux ondes sonores générées par la fabrication elle-même. Afin de déterminer l'applicabilité de la méthode au LMD, il serait pertinent de mener une démarche exploratoire similaire à celle proposée dans ces travaux et d'investiguer les fréquences recueillies avec ce type de mesure non-embarquée. En ce sens, les étapes de la démarche sont détaillées en Figure 4-23. Afin de déterminer la faisabilité d'une telle mesure au LMD, il peut être pertinent de choisir des scénarios de fabrication permettant d'isoler les différents phénomènes constituant le procédé [Koester 2018]. Par ailleurs, la comparaison des spectres sonores issus des stratégies de fabrication identifiées comme correcte(s) et incorrecte(s) permettrait de conclure sur l'existence de descripteurs fréquentiels discriminants, corrélés aux paramètres procédés et pouvant faire l'objet d'un contrôle en temps réel. La démarche détaillée en Figure 4-23 est générique et peut être appliquée à d'autres procédés de Fabrication Additive métallique et plus largement.

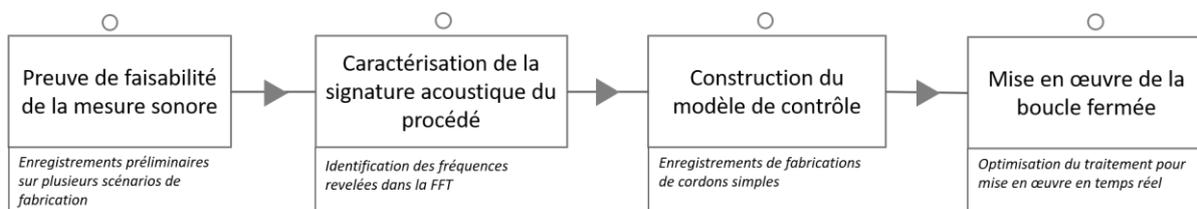


Figure 4-23 : étapes d'adaptation de la méthode de monitoring sonore à d'autres procédés.

## VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons investigué le potentiel de contrôle des procédés DED via des moyens sonores, dans l'optique de contrôler le *Stick Out* en cours de fabrication. Ces travaux ont permis de montrer que des descripteurs fréquentiels simples et discriminants pouvaient être identifiés dans la transformée de Fourier du signal mesuré par un capteur sonore de faible coût. Bien que présentée sur un cas particulier du procédé WAAM, la caractérisation de la signature acoustique d'un procédé avec la méthode de mesure est

générique et peut s'appliquer à d'autres modes de dépôt du procédé WAAM et plus largement aux procédés de FA basés sur un arc électrique [Ding 2015].

Parmi les fréquences relevées dans la caractérisation acoustique du procédé WAAM-CMT, une fréquence a été identifiée comme corrélée à la fréquence de court-circuit de l'arc. Un modèle reliant le SO et ce descripteur fréquentiel a été développé afin de proposer une méthode de contrôle du *Stick Out* simple et innovante. Pour un matériau donné, ce modèle peut être rapidement identifié sur des dépôts de cordons simples et directement appliqué sur des cas de fabrications à parois fines monocordons sans nécessiter d'ajustement.

La méthode de mesure sonore proposée dans ce chapitre présente plusieurs avantages. Tout d'abord, l'utilisation d'un capteur non-embarqué et l'indépendance des descripteurs fréquentiels d'intérêt à la position du microphone rendent la méthode de mesure simple à mettre en œuvre, flexible et applicable sur une large gamme de tailles de composants. Par ailleurs, ces travaux ont prouvé qu'un microphone de mesure dynamique de faible coût suffisait pour obtenir des performances de mesure permettant de réaliser un *monitoring* du procédé. A partir de la méthode de mesure sonore développée, nous avons proposé une stratégie de *monitoring* permettant de maintenir un *Stick Out* constant couche après couche par le biais d'un ajustement de la position de l'effecteur. Cette stratégie de *monitoring* sonore constitue une alternative originale et simple aux approches de contrôle du SO présentées dans la littérature. Dans le cadre de nos travaux, cette stratégie vient s'ajouter aux deux boucles de contrôle thermique et géométrique développées dans les chapitres précédents, afin de compenser les variations de *Stick Out* provoquées par leurs corrections et garantir des conditions de dépôt constantes tout au long de la fabrication.

En perspectives de ces travaux, il conviendra d'investiguer une application en temps réel de la stratégie de *monitoring* sonore proposée. Pour ce faire, des méthodes de *pitch detection*, non basées sur la Transformée de Fourier, pourraient être utilisées pour suivre le pic de fréquence d'intérêt en temps réel [De Cheveigné 2002, Hui 2006]. Une approche de correction des trajectoires par modèle inverse peut être mise en œuvre à partir des mesures du *Stick Out* en temps réel [Hascoët 1989].

# Chapitre 5 : Développements d'une méthode de mesure ultrasonique vers un *monitoring* de la santé matière

## I. Introduction

Dans le cadre des précédents chapitres, nous avons proposé différentes boucles de contrôle dans le but de maîtriser les caractéristiques de la pièce et les conditions de dépôt en cours de fabrication. Il s'agit maintenant d'aborder le dernier axe de contrôle identifié dans le contexte de cette thèse, qui concerne la santé matière de la pièce. Parmi les techniques de Contrôle Non Destructif (CND), la méthode par ultrasons est particulièrement employée pour inspecter les pièces issues de Fabrication Additive métallique, de par la compacité et les performances des équipements correspondants [Krautkramer 1990, Lopez 2017, Chauveau 2018]. Actuellement, les méthodes CND par ultrasons sont principalement destinées au contrôle post-fabrication des pièces DED [Lopez 2018, Javadi 2019]. L'implémentation de la mesure CND en cours de procédé à des fins de *monitoring* est encore au stade exploratoire [Xu 2017, Knezović 2018].

Dans ce chapitre, une méthode de mesure CND par ultrasons applicable aux procédés LMD et WAAM va être développée. A partir de cette méthode de mesure, une stratégie de *monitoring* de la santé matière entre les phases de dépôt sera proposée. Une preuve de faisabilité de mise en œuvre de la méthode de mesure sur un état de surface brut tel que rencontré en cours de fabrication WAAM sera présentée. Ces travaux ont été principalement réalisés en collaboration avec l'entreprise TPAC et le laboratoire LS2N de Centrale Nantes. Ils ont fait l'objet d'une publication scientifique dans le *Journal of Intelligent Manufacturing* [Chabot 2019].

## II. Etat de l'art du CND par ultrasons appliqués aux procédés de FA métallique

Une liste détaillée des différentes techniques de CND a été proposée par Lopez *et al.* [Lopez 2017] et l'état de l'art présenté dans Chauveau *et. al* dresse un aperçu récent du contrôle des pièces issues de FA métallique par *Ultrasonic Testing* (UT) [Chauveau 2018]. Dans la littérature, la majorité de ces applications concerne la technologie SLM [Rieder 2015, Xu 2017]. Concernant les procédés DED, seule l'utilisation de la technique de laser ultrasonique a été recensée à des fins de contrôle de la santé matière du procédé LMD [Millon 2018]. L'application des techniques de CND par ultrasons pour le procédé WAAM fait récemment l'objet d'un intérêt croissant [Lopez 2017, Knezović 2018, Javadi 2019].

Actuellement, les travaux recensés dans la littérature portent principalement sur l'application des méthodes de CND par ultrasons pour le contrôle de la santé matière post-fabrication. Deux techniques sont privilégiées : la technique conventionnelle [Lopez 2018, Javadi 2019] et la technique *Total Focusing Method* (TFM) faisant partie de la famille *Phased-Array Ultrasonic Technique* (PAUT) [Xu 2017, Lopez 2019, Javadi 2019]. Plus récemment, la technique d'imagerie appelée *Plane Wave Imaging* (PWI), issue du domaine médical, est appliquée aux procédés de Fabrication Additive métallique [Xu 2017]. Les différents cas recensés dans la littérature sont reportés en Tableau 5-1. La plupart des études considérées comparent les performances de plusieurs techniques par ultrasons vis-à-vis des pièces de Fabrication Additive métallique [Rieder 2015, Xu 2017, Lopez 2018, Javadi 2019]. Les techniques sont comparées sur des spécimens de géométries simples, présentant principalement des défauts calibrés, délibérément introduits dans les spécimens inspectés [Xu 2017, Lopez 2019, Javadi 2019]. L'inspection de défauts réels générés en cours de fabrication a été également menée par Lopez *et al.* avec des méthodes destructives – mesures sur macrographie [Lopez 2018] – ou non-destructives – radiographie par rayons X [Lopez 2019] – afin de valider la pertinence du dimensionnement mené avec les méthodes ultrasons.

Les études précédemment citées concluent favorablement sur la capacité des techniques TFM et PWI à détecter et dimensionner les défauts présents dans les pièces de Fabrication Additive métallique, en étape de contrôle post-fabrication. Il convient d'indiquer qu'il n'existe pas d'unique solution adaptée à l'inspection de l'ensemble des procédés et des types de défauts rencontrés en Fabrication Additive métallique. En effet, de par les différents principes de fonctionnement, les techniques TFM et PWI sont pertinentes dans différentes configurations et le choix de la méthode sera fonction de la taille de la pièce et des défauts d'intérêt [Xu 2017].

Tableau 5-1 : Récapitulatif des applications des méthodes ultrasoniques aux procédés de Fabrication Additive métallique.

Référence	Procédé	Technique	Cas d'application	Matériau
Xu 2017	WAAM	PWI TFM	Défauts calibrés FBH Ø 0,8 mm	Alliage titane
Lopez 2018	WAAM	Conventionnelle TFM	Défauts réels Porosités, fissures	Alliage aluminium AA5083 Acier ER70S
Lopez 2019	WAAM	TFM	Défauts calibrés FBH Ø 2 – 5 mm	Alliage aluminium
Javadi 2019	WAAM	Conventionnelle TFM	Défauts calibrés FBH 0,5 – 3 mm	Aluminium

L'intégration des méthodes de CND par ultrasons dans le processus de fabrication, à des fins de *monitoring* est un axe de recherche encore en phase exploratoire actuellement. Dans la littérature, quelques études préliminaires ont été recensées pour le SLM [Rieder 2015], le WAAM [Knezović 2018] et l'*Ultrasonic Additive Manufacturing* [Nadimpalli 2016]. Dans ces études, les réflexions menées portent principalement sur le montage expérimental permettant une mesure en cours de fabrication, non nécessairement en phase de dépôt [Nadimpalli 2016, Knezović 2018]. Notamment, trois configurations ont été proposées jusqu'à présent : une mesure depuis le dessus de la pièce schématisée en Figure 5-1.a, une mesure latérale, schématisée en Figure 5-1.b et une mesure depuis la surface inférieure du substrat, schématisée en Figure 5-1.c [Knezović 2018]. Concernant le procédé l'*Ultrasonic Additive Manufacturing*, Nadimpalli a discuté la pertinence des configurations de mesure par-dessus la pièce, comme en Figure 5-1.a et par-dessous le substrat, comme en Figure 5-1.c [Nadimpalli 2016]. L'un des principaux obstacles à une implémentation des solutions de mesure latérale ou par le dessus du substrat est l'état de surface des pièces, nuisant à la qualité de la mesure [Knezović 2018, Lopez 2018]. L'inspection depuis le substrat paraît pertinente puisque permettant de s'affranchir des problèmes de qualité de mesure liés à l'état de surface des cordons [Knezović 2018] et compatible avec une mise en œuvre en temps réel [Nadimpalli 2016]. Cependant, dans ce type de montage, la sonde étant a priori fixe sous le substrat, la zone d'inspection est plus limitée que les deux autres configurations envisagées [Nadimpalli 2016]. Par ailleurs, ce montage ne semble pas convenir pour des grandes pièces balancées, avec des géométries déportées par rapport au substrat, comme c'est le cas des hélices par exemple.

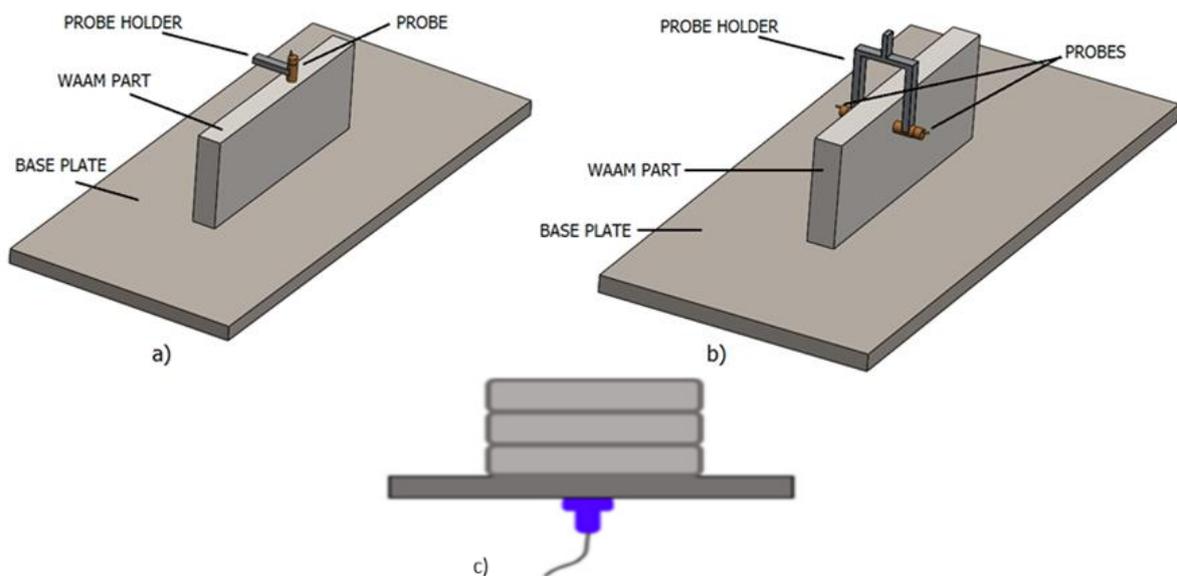


Figure 5-1 : montages de sonde envisagés pour un contrôle in-situ du WAAM.

a) mesure au-dessus du mur, b) mesure latérale du mur, c) mesure par-dessous le substrat [Knezović 2018].

Des études préliminaires d'inspection en cours de dépôt ont été menées par Rieder *et al.* [Rieder 2015] et Nadimpalli *et al.* [Nadimpalli 2016]. Pour le SLM, Rieder *et al.* ont principalement étudié la faisabilité des mesures en cours de dépôt. Ils ont notamment mis en évidence une variation de la vitesse des ondes dans le matériau en fonction de l'accumulation de chaleur, ce qui impacte nécessairement la qualité des mesures [Rieder 2015]. Concernant le procédé *Ultrasonic Additive Manufacturing*, de premières inspections en temps réel prometteuses ouvrent la voie vers des perspectives de détection en temps réel d'un défaut de délamination entre les cordons et le substrat en considérant les variations de *Time-of-Flight* des ondes, ainsi que les phénomènes d'atténuation du signal [Nadimpalli 2016].

A travers l'état de l'art présenté, nous avons pu identifier des méthodes de contrôle par ultrasons pertinentes pour contrôler la santé matière des procédés DED. L'intégration de ces méthodes dans le processus de fabrication, que ce soit en *in-situ* ou en temps réel constitue un des enjeux majeurs actuels. En effet, cette intégration permettrait de détecter l'apparition de défauts en cours de fabrication et ainsi d'adapter la stratégie de fabrication pour effectuer des économies de temps et de matière. Dans cette optique, les principaux verrous identifiés concernent :

- la difficulté de réaliser une mesure UT en *in-situ*, notamment à cause de la dépendance de la qualité de la mesure à l'état de surface ;
- la faisabilité d'une inspection en cours de dépôt, en tenant compte des problématiques de températures mises en jeu.

### III. Développement d'une méthode de mesure de la santé matière pour les procédés DED

#### 1. Introduction

Dans cette section, une méthode de mesure CND par ultrasons applicable aux procédés LMD et WAAM est présentée. Conformément aux verrous énoncés à l'issue de l'état de l'art, nous proposons d'orienter ces travaux sur les axes de recherches suivant :

- la proposition d'une méthode de mesure UT permettant de dimensionner les défauts rencontrés ;
- l'intégration de la méthode de mesure dans l'environnement de fabrication.

Dans ces travaux, la méthode de mesure proposée va être mise en œuvre sur des pièces fabriquées en alliage d'aluminium par le procédé WAAM. Par ailleurs, la méthode de mesure a également été adaptée au procédé LMD pour prouver son applicabilité à différents procédés DED.

#### 2. Montages expérimentaux et post-traitement

Le matériel ultrasonique utilisé se compose d'un générateur d'ondes ultrasons fabriqué par TPAC (West Chester, Ohio, USA) et de sondes fabriquées par Imasonic (Voray-sur-l'Ognon, France). Pour réaliser les inspections des pièces directement dans l'environnement de fabrication, le montage expérimental proposé est illustré en Figure 5-2. La sonde ultrasonique est fixée hermétiquement à un *water wedge*, assimilé à une poche remplie d'eau, afin de reproduire localement les conditions de couplage comme lors d'une mesure en immersion. L'utilisation d'un milieu aqueux comme couplant entre la sonde et la pièce permet de minimiser la « zone morte » sous la surface, due aux changements d'impédance entre le milieu couplant et le spécimen inspecté. Par ailleurs, l'utilisation d'un *water wedge* permet d'inspecter une large gamme de pièces issues de différents procédés. Les pièces concernées doivent être au moins de la largeur de la sonde et posséder des surfaces planes ou quasi-planes. Dans l'optique de réaliser des scans 3D, il est nécessaire de maîtriser le déplacement de la sonde, au moyen d'un bras robotisé par exemple.



Figure 5-2 : (a) montage de la sonde sur un water wedge et (b) montage expérimental dans le cadre de l'application au procédé WAAM.

L'acquisition, la visualisation et le traitement des scans sont effectués en temps réel via une *Graphic Processing Unit* et un code mis en œuvre par TPAC. Dans ces travaux, la fréquence d'acquisition des images est de l'ordre de 10 fps et les gains d'acquisition d'entrée et de sortie sont respectivement de 10 dB et 45 dB. Afin de reconstruire les images ultrasoniques à partir des données, une vitesse de propagation des ondes dans l'aluminium de 6100 m/s est considérée [François 2009]. Un algorithme adaptatif [Le Jeune 2015] est utilisé pour détecter automatiquement la surface du spécimen et traiter les données de manière à afficher une image ultrasonique plane, indépendamment de l'angle de la surface réelle.

Un exemple de scans est illustré en Figure 5-3. Les scans 3D des pièces sont étudiés sous forme de graphes en 2D, appelés Bscan, Cscan et Dscan et présentant respectivement les coupes dans les plans X-Z, X-Y et Y-Z. Chaque graphe est une reconstruction des échos mesurés par tous les transducteurs de la sonde. Pour chaque graphe, l'amplitude de chaque voxel est égale à l'intensité maximale mesurée dans la 3<sup>e</sup> dimension hors du plan considéré. A l'issue de la reconstruction, les niveaux d'amplitude de l'image ultrasonique complète sont convertis en dB, puis normalisés de manière à obtenir des valeurs indépendantes des gains d'acquisitions.

Dans les Figure 5-3.a et Figure 5-3.c, on remarque deux lignes d'échos à  $Z=0$  mm et  $Z=20$  mm, qui correspondent aux surfaces supérieures et inférieures du spécimen scanné. Entre ces deux lignes d'échos, différents réflecteurs avec des amplitudes proches du maximum peuvent être observés. Notamment, dans l'exemple d'inspection présenté en Figure 5-3, un réflecteur est mis en évidence aux coordonnées  $\{X\sim 19$  mm,  $Y\sim 70$  mm,  $Z\sim 9$  mm $\}$  dans les trois graphes. Les réflecteurs observés dans les scans correspondent a priori à des défauts présents dans la pièce réelle. Afin de caractériser les défauts détectés, la taille et la position sont moyennées à partir des données des trois graphes. La taille du défaut est calculée en considérant l'amplitude à -6 dB par rapport à l'amplitude maximale mesurée, selon la démarche utilisée dans [Blitz 1996, Halmschaw 1996, Felice 2018]. Cette démarche est illustrée en Figure 5-4.

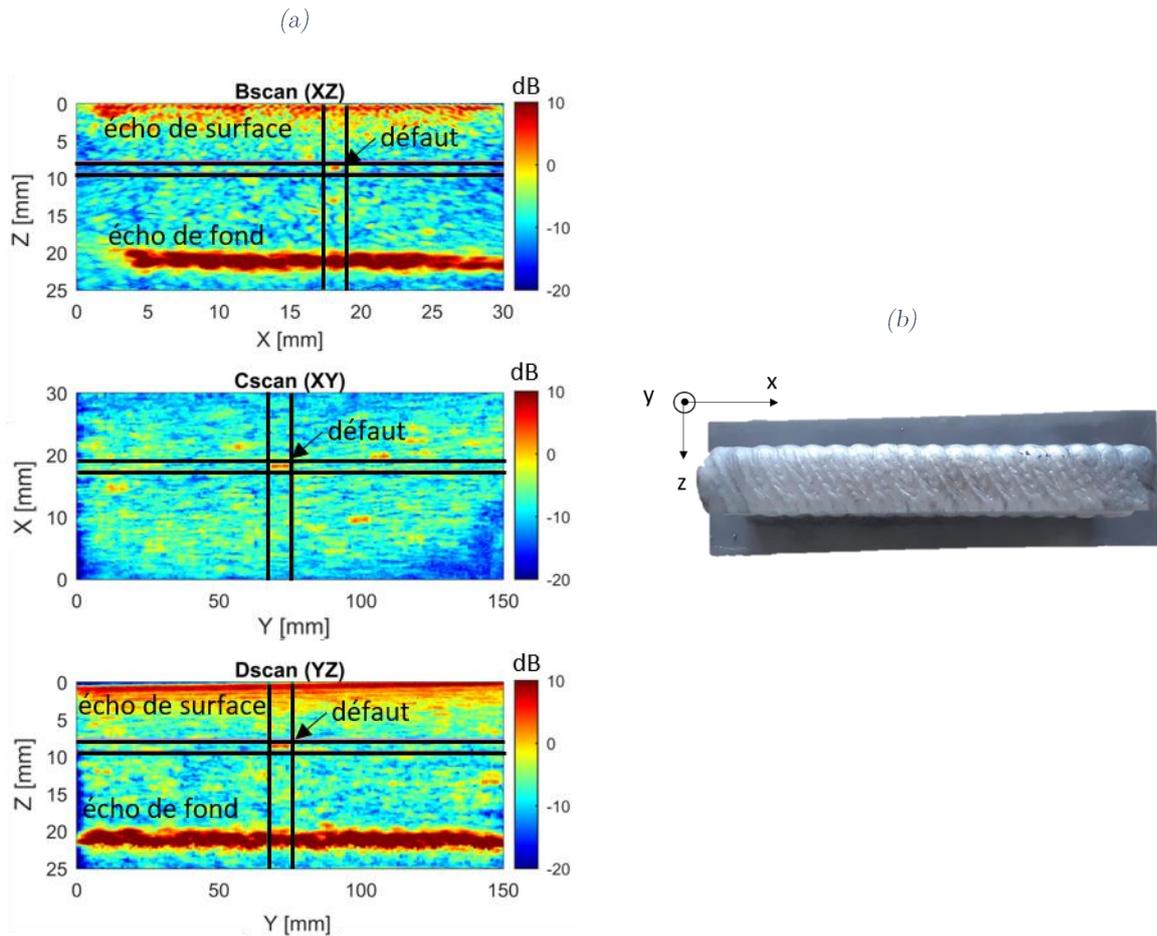


Figure 5-3 : (a) exemple de scan ultrasonique 3D d'un spécimen en alliage d'aluminium fabriqué par le procédé WAAM, (b) vue de dessus du spécimen – plan XZ.

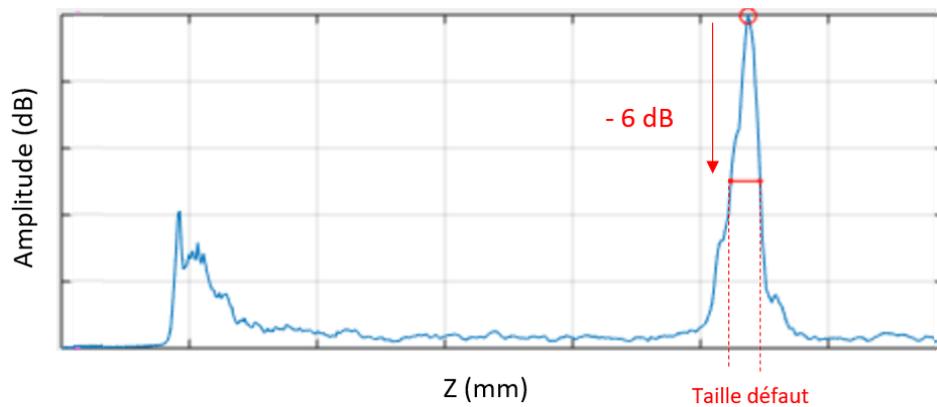


Figure 5-4 : calcul de la taille du défaut détectée par la méthode PAUT dans le cas général.

### 3. Choix de la technique d'imagerie et de la sonde

Parmi les différentes méthodes identifiées dans l'état de l'art, nous avons choisi de privilégier la technique TFM par rapport à la technique PWI pour développer notre méthode de mesure. En effet, ce mode d'imagerie utilise des sondes multitransducteurs et est basé sur une mesure simultanée par un tir ultrasonique avec tous les transducteurs de la sonde, ce qui favorise un bon rapport signal-bruit et une meilleure résolution d'image par rapport à la technique PWI, au détriment de la profondeur de pénétration des ondes [Le Jeune 2015, Xu 2017]. Malgré l'augmentation du temps de traitement de la mesure en TFM, due à la participation de tous les éléments à chaque tir, les temps de traitement rencontrés dans nos applications avec le matériel de TPAC – de l'ordre de 0,1 s – sont compatibles avec les temps de fabrication d'une couche. Les éléments précédemment évoqués ont donc motivé les choix de la technique TFM.

Indépendamment du mode d'imagerie choisi, le design de la sonde ultrasonique doit être adapté au cas d'application [Felice 2018]. Notamment, la fréquence de la sonde doit être adaptée à la nature du matériau ainsi qu'à la taille minimale des défauts caractéristiques à détecter. Pour ce faire, la fréquence du signal est choisie en fonction de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau et la longueur d'onde du signal, de l'ordre de la taille des défauts observés, comme explicité par l'Equation 5-1.

$$f = \frac{v}{\lambda} \qquad \text{Equation 5-1}$$

Avec :  $\lambda$  longueur d'onde du signal en m,

$v$  vitesse de propagation du son dans le matériau d'intérêt en m/s,

$f$  fréquence du signal en Hz.

D'après l'Equation 5-1, deux sondes ont été sélectionnées pour les différents procédés LMD et WAAM. Les caractéristiques des sondes sont reportées en Tableau 5-2. Il convient de remarquer que la sonde 18,5 MHz peut également être utilisée pour le procédé WAAM, dans l'optique d'améliorer la précision. Cependant, l'augmentation de la fréquence de la sonde va de pair avec l'augmentation du temps de traitement des signaux. Dans ces travaux, la sonde à 10 MHz a été choisie afin d'optimiser les temps de traitement. De manière générale, des études numériques peuvent être mises en œuvre pour déterminer la sonde optimale au regard du procédé, du matériau, des types et taille de défauts d'intérêt [Cerniglia 2018, Lopez 2019].

Tableau 5-2 : sondes sélectionnées pour l'application du contrôle ultrasonique aux procédés LMD et WAAM.

	Sonde pour LMD	Sonde pour WAAM
Fréquence	18,5 MHz	10 MHz
Nombre d'éléments	128	128
Pitch	0,26 mm	0,25 mm
Longueur d'onde *	0,3 mm	0,6 mm
Ordre de grandeur de taille des défauts observés	De 1 $\mu\text{m}$ à 0,1 mm	De 0,1 mm à 1 mm

\* Caractéristiques dans le cas d'un alliage d'aluminium.

Des exemples d'inspection de pièces WAAM et LMD avec les sondes correspondantes, respectivement 10 et 18,5 MHz, sont présentés en Figure 5-5 et Figure 5-6. En Figure 5-5, l'application présentée au procédé WAAM concerne une pale d'hélice en alliage d'aluminium. En Figure 5-6, le spécimen sélectionné pour l'application au LMD est un mur monocordon en acier inoxydable usiné localement. Nous pouvons constater que le choix des sondes permet de réduire l'écho de surface à environ un millimètre pour les deux procédés. Ainsi, la mesure CND n'est a priori pas applicable aux pièces d'épaisseurs inférieures au millimètre.

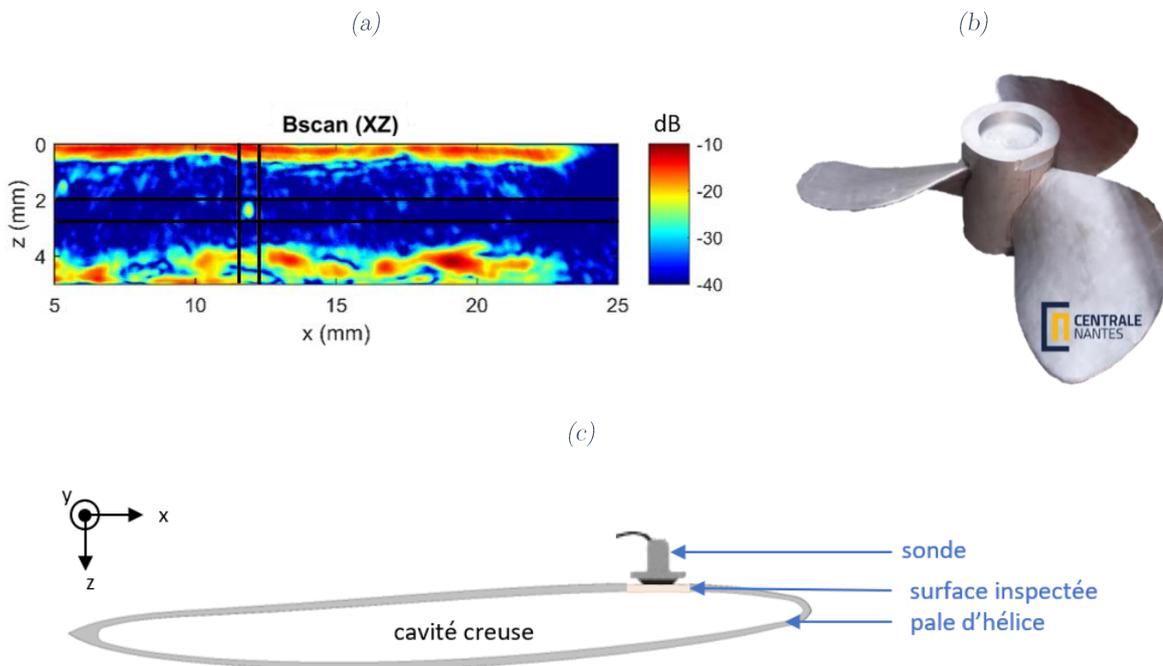


Figure 5-5 : (a) exemple de scan ultrasonique pour l'inspection avec la sonde 10 MHz d'une pale d'hélice en alliage d'aluminium fabriquée par le procédé WAAM, (b) vue de l'hélice complète, (c) coupe dans le plan XZ d'une pale.

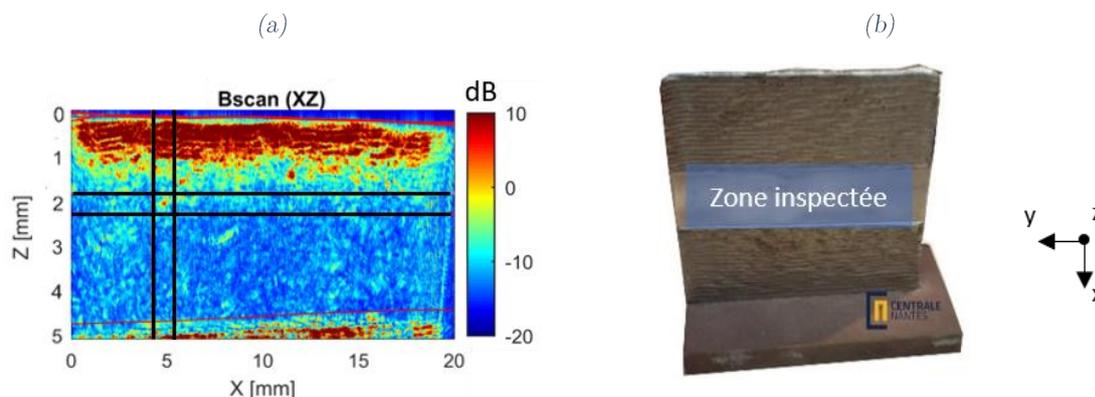


Figure 5-6 : (a) exemple de scan ultrasonique pour l'inspection avec la sonde 18,5 MHz d'un mur en acier inoxydable 316 L fabriqué par le procédé LMD, (b) vue du mur dans le plan XY.

## 4. Calibration du capteur et qualification de la mesure

### 4.1. Calibration de la sonde

Dans la méthode PAUT, quelle que soit la technique employée, l'intensité du réflecteur mesurée dépend entre autres :

- des caractéristiques de la sonde et des gains d'acquisitions ;
- de la taille et de la position du défaut réel par rapport à la sonde.

A notre connaissance, aucun modèle analytique prenant en compte les paramètres listés n'a été développé. Ainsi, dans ces travaux, nous avons choisi de développer un modèle de calibration liant l'intensité du réflecteur mesurée avec le diamètre et la distance au centre de la sonde du défaut réel correspondant, pour une certaine profondeur fixée. La construction de ce modèle de calibration est détaillée ci-après.

En première approche, la calibration est menée sur des défauts volontairement introduits dans le spécimen d'intérêt. Le spécimen de calibration fabriqué spécifiquement pour l'étude est illustré en Figure 5-7: il s'agit d'un bloc multicordon en alliage d'aluminium de la série 5356, déposé par le procédé WAAM puis usiné aux dimensions 140 x 60 x 20 mm<sup>3</sup>. Dans ce bloc, trois séries de quatre perçages, de diamètre allant de Ø0,6 mm à Ø1,2 mm, ont été percées à 10 mm, 30 mm et 50 mm de la surface du bloc, afin de reproduire plusieurs profondeurs entre la sonde et le défaut.

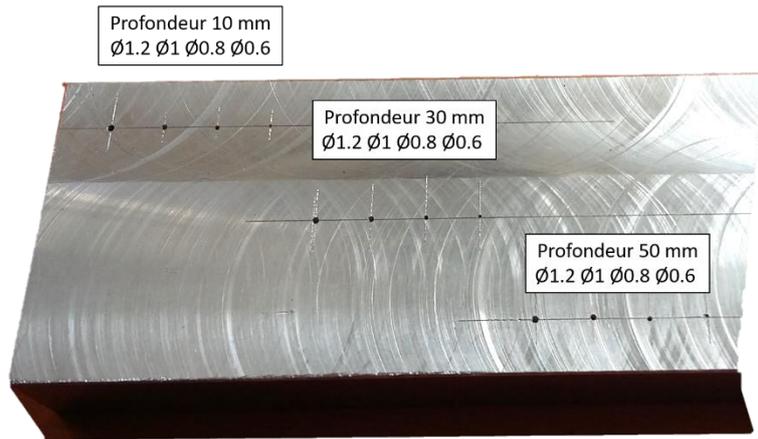


Figure 5-7 : bloc en alliage d'aluminium réalisé pour la calibration de la technique TFM.

Les travaux de calibration de la méthode sont menés avec la sonde de 10 MHz pour procédé WAAM. Afin de maîtriser le déplacement de la sonde lors des scans 3D, les scans sont réalisés en immersion dans une cuve avec un bras robotisé. Le montage est illustré en Figure 5-8. Concernant la prise de mesure, il a été choisi d'inspecter le bloc de calibration précédemment décrit perpendiculairement à la direction des perçages. De cette façon, des défauts de type *Side-Drilled Holes* (SDH) sont observés.

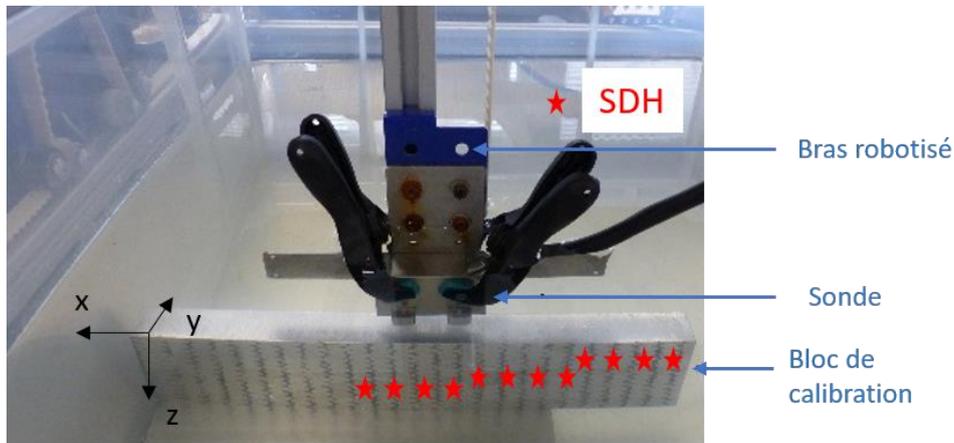


Figure 5-8 : montage expérimental pour les inspections du bloc de calibration.

La calibration de la mesure TFM a été menée sur la première série de défauts à profondeur 10 mm seulement. La démarche suivie est cependant générique et peut être appliquée similairement à d'autres profondeurs. Pour la première série de défauts, quatre scans ont été réalisés en déplaçant la sonde avec le bras robotisé à une vitesse de 0,5 mm/s. Chaque scan contient 64 images ultrasoniques, telles que celle illustrée en Figure 5-9. En Figure 5-9, les quatre défauts d'intérêt ont été identifiés et d'autres réflecteurs peuvent également être relevés sur le scan, correspondant à des défauts réels de la pièce non considérés ici.

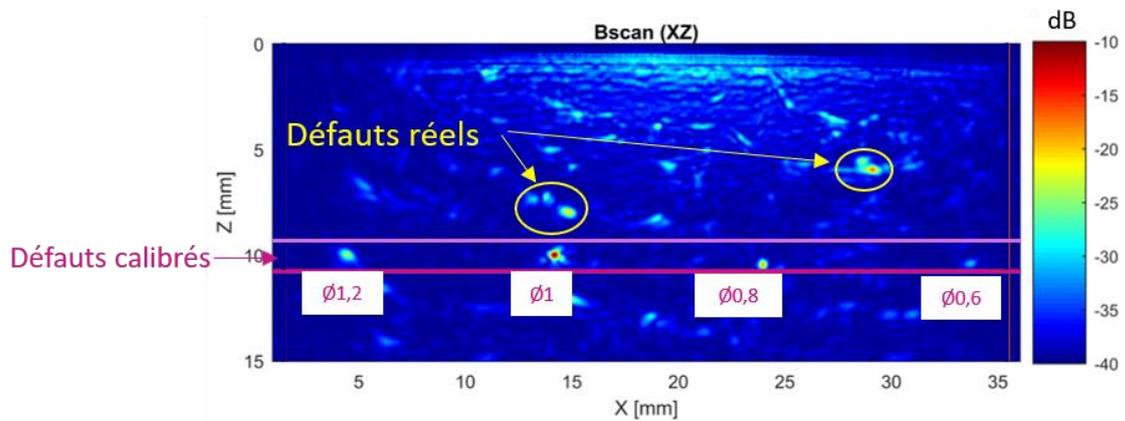


Figure 5-9 : scan ultrasonique de la première série de défauts SDH du bloc de calibration – profondeur 10 mm.

Pour chaque image ultrasonique, l'intensité et la distance au centre de la sonde des quatre réflecteurs est calculée et reportée dans l'abaque de calibration illustré en Figure 5-10. Chaque courbe correspond à un diamètre de défaut : pour chaque taille de défaut, les points représentent les intensités mesurées dans les différentes images ultrasoniques. À partir de ces points, les moyennes et intervalles de confiance sont calculés avec des processus Gaussiens [Rasmussen 2006].

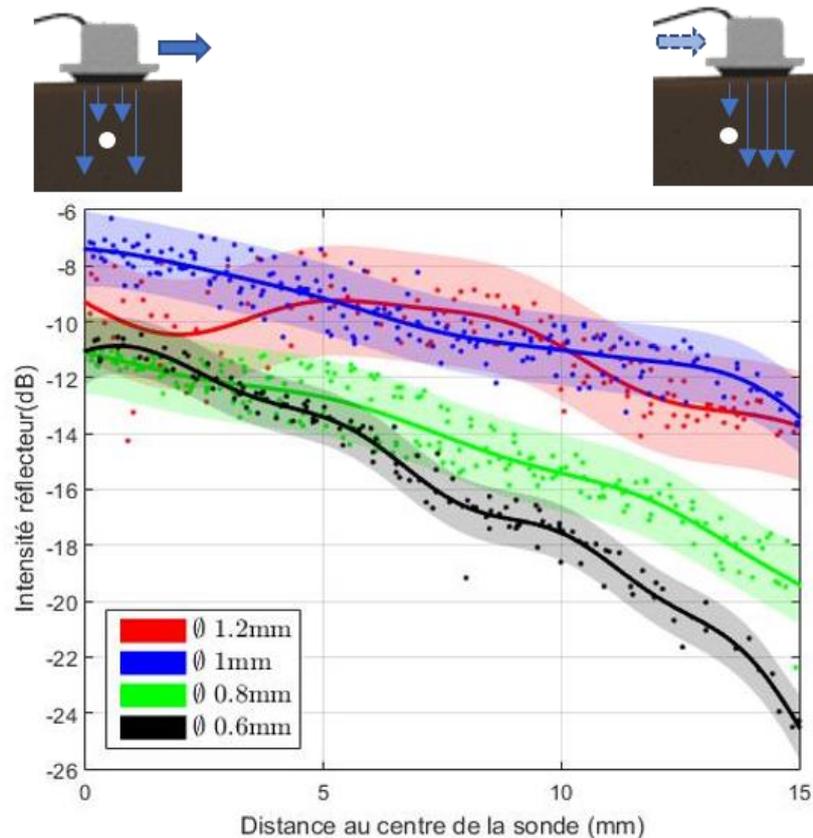


Figure 5-10 : abaque de calibration pour la configuration d'intérêt.

En Figure 5-10, l'intensité des défauts diminue avec la distance au centre de la sonde. Cette tendance est attendue puisque l'amplitude des voxels de l'image est calculée en sommant les échos de tous les transducteurs et de moins en moins d'éléments contribuent à détecter le défaut vers les extrémités de la sonde. Par ailleurs, on note une augmentation générale de l'intensité l'amplitude mesurée augmente avec le diamètre du défaut correspondant. Cependant, dans cette configuration, certaines courbes de calibration se chevauchent, comme par exemple pour les défauts de  $\varnothing 1$  et  $\varnothing 1,2$  mm sur la totalité de la sonde, ou pour les défauts de  $\varnothing 0,6$  et  $\varnothing 0,8$  mm jusqu'à 6 mm depuis le centre de la sonde. Il semble donc important de réaliser des scans mobiles 3D des pièces afin de détecter les défauts réels sous plusieurs positions et ainsi favoriser la fiabilité des résultats de dimensionnement.

#### 4.2. Confrontation avec des radiographies

Dans cette section, des radiographies par rayons X (RT) sont utilisées comme référence pour vérifier la fiabilité de la calibration de la mesure UT menée précédemment. Le cas d'application correspondant est illustré en Figure 5-11. Il s'agit d'un mur multicordon en alliage d'aluminium 5356, de dimensions 155x100x20 mm<sup>3</sup>, fabriqué par le procédé WAAM, puis usiné partiellement sur une surface afin de faciliter la mesure ultrasonique.



Figure 5-11 : mur multicordon en alliage d'aluminium WAAM sélectionné pour la qualification de la méthode CND.

La comparaison des résultats des mesures TFM et RT est menée sur deux porosités détectées dans la partie haute du mur, soit sous la surface usinée. Les radiographies des deux porosités sont illustrées en Figure 5-12 et les scans ultrasoniques correspondants sont illustrés en Figure 5-13.

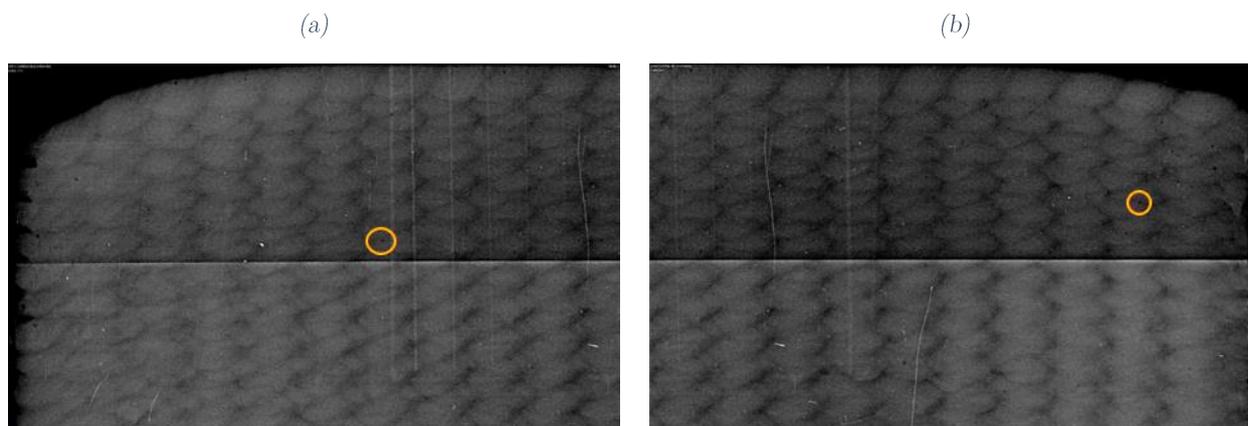


Figure 5-12 : (a) radiographie de la porosité n°1, (b) radiographie de la porosité n°2.

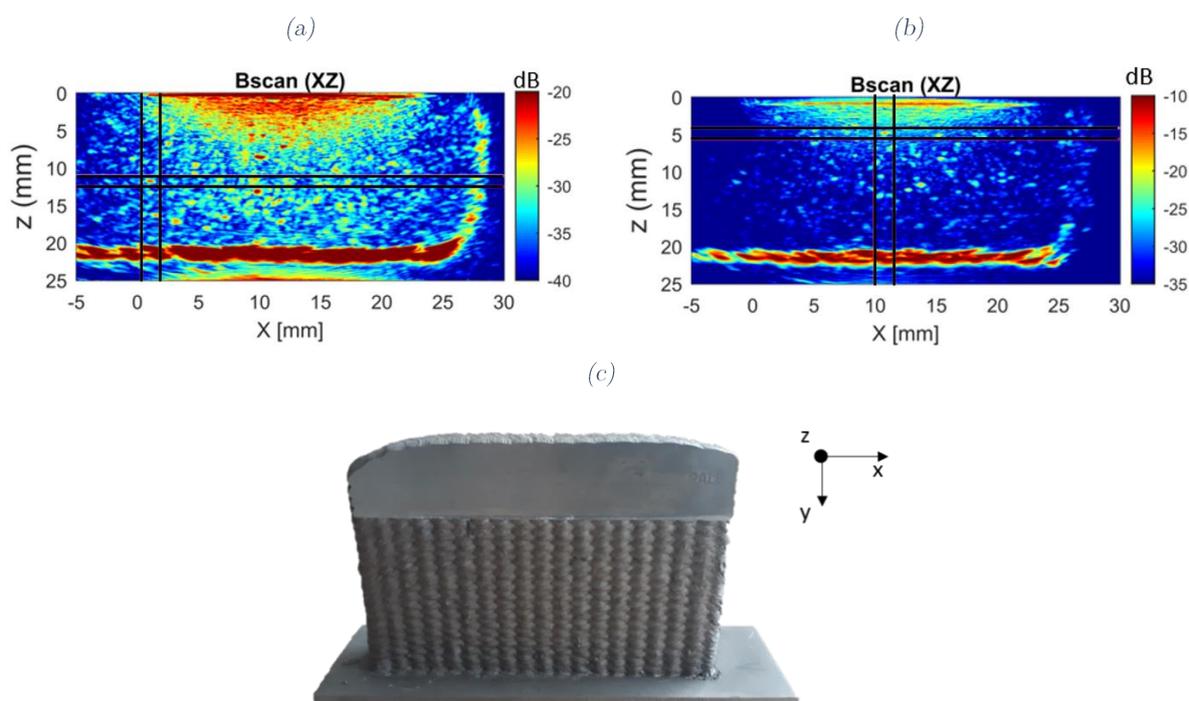


Figure 5-13 : (a) images ultrasoniques de la porosité n°1, (b) images ultrasoniques de la porosité n°2, (c) positionnement de la mesure.

Les dimensionnements des porosités considérées par les deux techniques sont récapitulés en Tableau 5-3. Nous remarquons que pour ce cas d'intérêt, la technique TFM sous-dimensionne les porosités par rapport aux tailles de références obtenues via RT. Ces résultats montrent donc que la calibration réalisée précédemment se base sur des niveaux d'amplitude surévalués, ce qui est lié à la considération de défauts de type SDH. En effet, il convient de rappeler que l'amplitude des scans 2D est calculée en fonction de la valeur maximale d'amplitude relevée le long du 3<sup>e</sup> axe. Ainsi, du fait du caractère débouchant des perçages, les SDH sont plus échogènes que les défauts réels et fermés considérés ici. Afin de palier à ce problème, il conviendrait de mener la calibration en inspectant les défauts volontairement introduits parallèlement à la direction de perçage, de façon à observer des *Flat Bottom Holes*.

Tableau 5-3 : résultats de dimensionnement des deux porosités d'intérêt avec les méthodes UT et RT.

	Porosité n°1	Porosité n°2
Taille estimée via UT	<0,6 mm	0,6 mm
Taille estimée via RT (référence)	0,69 mm	0,88 mm

#### 4.3. Etude de répétabilité

L'étude de répétabilité de la mesure est conduite sur le même mur multicordon sélectionné précédemment pour la confrontation avec les mesures RT – voir Figure 5-11. En particulier, différentes porosités localisées dans le haut du mur sont inspectées plusieurs fois à la suite. Les résultats correspondants sont reportés en Tableau 5-4 et la Figure 5-14. Il semble que l'incertitude de mesure augmente avec la distance au centre de la sonde. Afin d'éprouver ce résultat, il conviendrait de mener des inspections supplémentaires sur le mur d'intérêt ainsi que sur d'autres spécimens fabriqués dans le même matériau.

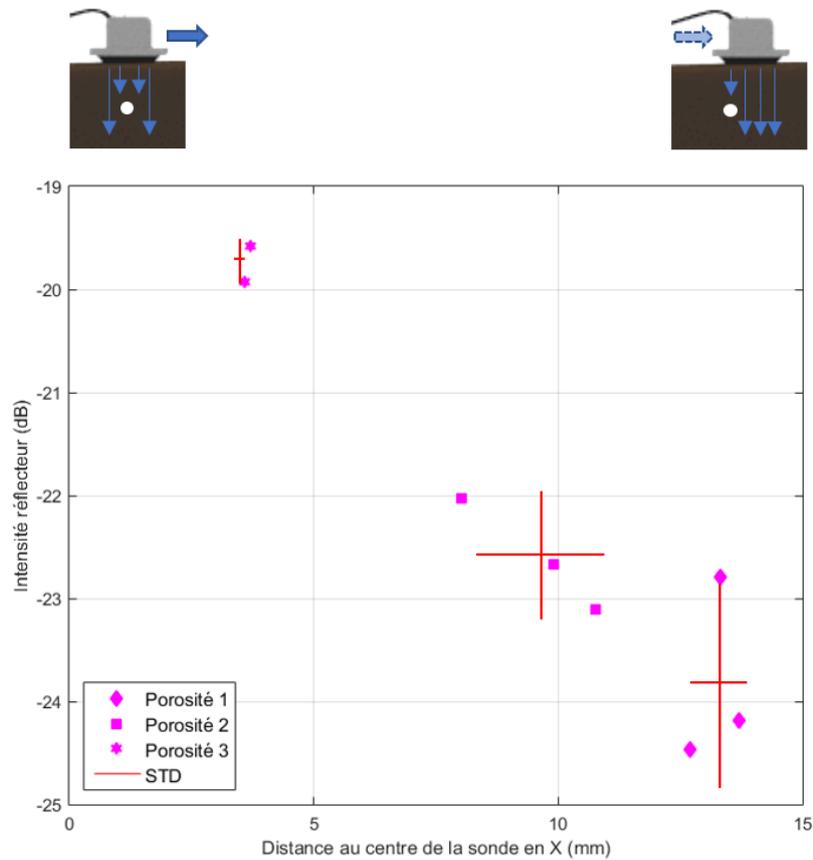


Figure 5-14 : illustration des résultats de répétabilité dans l'abaque de calibration de la méthode CND.

Tableau 5-4 : résultats des résultats de répétabilité de la méthode CND.

	Porosité n°1	Porosité n°2	Porosité n°3
Position moyenne (mm)	13,23 <sup>±0,5</sup>	9,57 <sup>±1,4</sup>	3,65 <sup>±0,09</sup>
Amplitude moyenne (dB)	-23,81 <sup>±0,90</sup>	-22,60 <sup>±0,54</sup>	-19,75 <sup>±0,24</sup>

## 5. Bilan

Les travaux de qualification de la mesure montrent qu'à ce stade de développement, la méthode UT proposée permet de dimensionner les défauts de type porosités entre 0,6 et 1,2 mm de manière qualitative. Des pistes d'amélioration de l'étape de calibration peuvent être proposées afin d'obtenir des résultats plus fiables. Afin d'améliorer la qualité de la calibration de la technique TFM proposée dans ces travaux, en termes de justesse et de détection de porosités plus petites, il conviendrait par exemple de construire l'abaque de calibration à partir d'une plus large quantité de données, obtenues sur divers cas d'application – matériau, taille de défaut – dans la même configuration de mesure. Par ailleurs, l'amélioration de la précision du dimensionnement via les méthodes UT reste un axe de recherche important [Lopez 2018 & 2019].

Il convient de rappeler que la méthode de mesure présentée ici sur le procédé WAAM peut être appliquée de la même manière au LMD, moyennant l'utilisation d'une sonde de plus haute fréquence comme proposée dans ces travaux – voir Figure 5-6.

## IV. Perspectives de *monitoring* de la santé matière des procédés DED

### 1. Approche de *monitoring* de la santé matière

L'approche de *monitoring* de la santé matière proposée est illustrée en Figure 5-15. Dans cette stratégie, il est proposé d'inspecter la pièce entre les phases de dépôt. Lors de l'inspection, la sonde est déplacée sur la face latérale de la pièce, afin de détecter et les défauts générés lors de la phase de dépôt précédente. L'identification et le dimensionnement des défauts détectés permet de conclure sur la qualité de la santé matière de la pièce et d'adapter la stratégie de fabrication en conséquence. En particulier, dans le cas de présence de défauts dimensionnés au-dessus d'une taille maximale admissible, des solutions telles que l'arrêt de la fabrication ou l'usinage des couches concernées et la reprise de leur dépôt peuvent être envisagées.

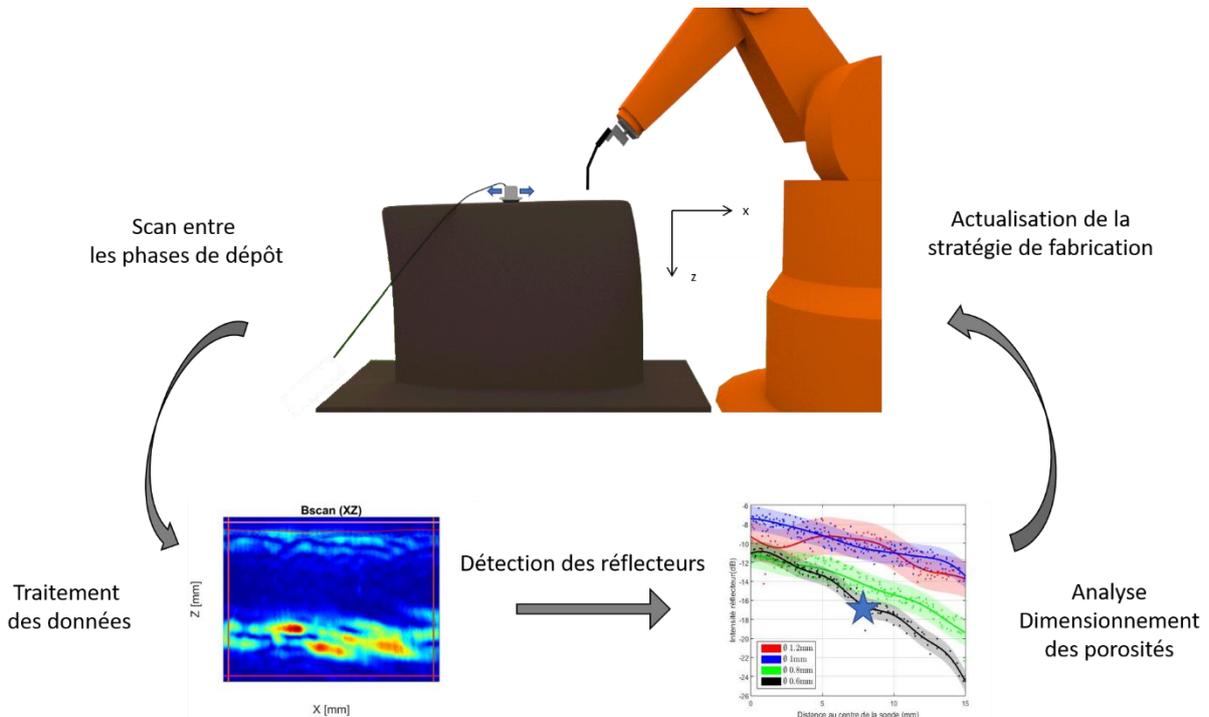


Figure 5-15 : approche de monitoring de la santé matière proposée dans ces travaux.

Dans l'optique d'une inspection entre les phases de dépôt, il convient d'adapter la configuration de mesure à la géométrie de la pièce, de façon à optimiser la profondeur à pénétrer – hauteur ou épaisseur de pièce suivant la configuration – aux performances de la sonde [Rieder 2015]. Quelle que soit la configuration, il est indispensable de prendre en compte les champs thermiques de la pièce dans la mise en œuvre de la mesure, afin d'éviter une potentielle dégradation du montage et de garantir la stabilité de la mesure ultrasonique [Rieder 2015]. Pour ce faire, une stratégie de *monitoring* thermique telle que développée dans le Chapitre 2 de ce manuscrit peut être employée [Chabot 2019]. Par ailleurs, il convient de rappeler les limitations de mise en œuvre de la mesure sur des pièces à parois fines, liées à la largeur de la sonde et à l'écho de surface masquant les premiers millimètres de matière.

Afin de développer une stratégie de *monitoring* de la santé matière robuste, plusieurs axes de recherche sont à investiguer, notamment :

- la faisabilité d'un scan 3D sur une surface brute avec la technique TFM ;
- l'impact de la température sur l'équipement et la fiabilité des mesures [Rieder 2015] ;
- l'extraction de données et descripteurs pertinents pour la recherche de défauts, dans l'optique de la boucle de rétroaction.

Dans le cadre de ces travaux, le premier point concernant la faisabilité d'une mesure sur une surface brute de dépôt WAAM a été étudié et fait l'objet de la section suivante.

## 2. Preuve de faisabilité de mesure sur une surface brute de dépôt WAAM

Dans l'optique d'effectuer un *monitoring* de la santé matière entre les phases de dépôt, l'usinage préalable de la surface de la pièce n'est pas souhaitable, car pouvant allonger et complexifier la stratégie de fabrication. Ainsi, l'inspection depuis une surface brute constituerait un levier prometteur pour la mise en œuvre d'un contrôle par ultrasons en cours de fabrication. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser une sonde ultrasonique de fréquence plus basse, afin de rendre la mesure moins sensible à la rugosité de la surface brute de dépôt [Nadimpalli 2016]. De manière évidente, l'augmentation de la longueur d'onde de la sonde va de pair avec l'augmentation de la taille des défauts détectés. Au-delà de cette modification de la gamme de défauts détectés, il convient d'accentuer que la possibilité de détecter, d'identifier et de produire un dimensionnement qualitatif des défauts directement en cours de fabrication constituerait une avancée majeure pour le contrôle des pièces DED.

Dans ces travaux, il est choisi d'explorer la solution d'inspection depuis une surface latérale d'une pièce en cours de fabrication WAAM. Pour ces travaux exploratoires, une sonde de 5 MHz, dont les caractéristiques sont reportées en Tableau 5-5, est sélectionnée. Le spécimen inspecté est à nouveau un mur multicordon WAAM en alliage d'aluminium, illustré en Figure 5-16. La Figure 5-17 présente les scans ultrasoniques préliminaires issus de l'inspection depuis la surface brute du spécimen, comme schématisé en Figure 5-16.

Tableau 5-5 : caractéristiques de la sonde 5 MHz utilisée pour les perspectives de monitoring de la santé matière.

	Sonde pour mesure <i>in-situ</i>
Fréquence	5 MHz
Nombre d'éléments	128
Pitch	0,94 mm
Longueur d'onde *	1,22 mm

\* Caractéristiques dans le cas d'un alliage d'aluminium.

(a)

(b)

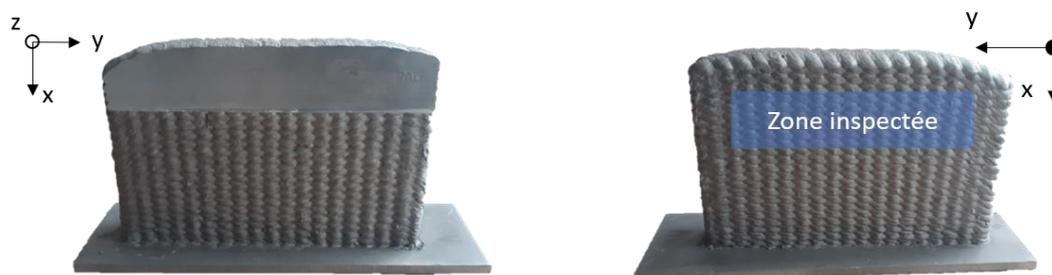


Figure 5-16 : mur multicordon en alliage d'aluminium WAAM. (a) vue de face, (b) vue arrière.

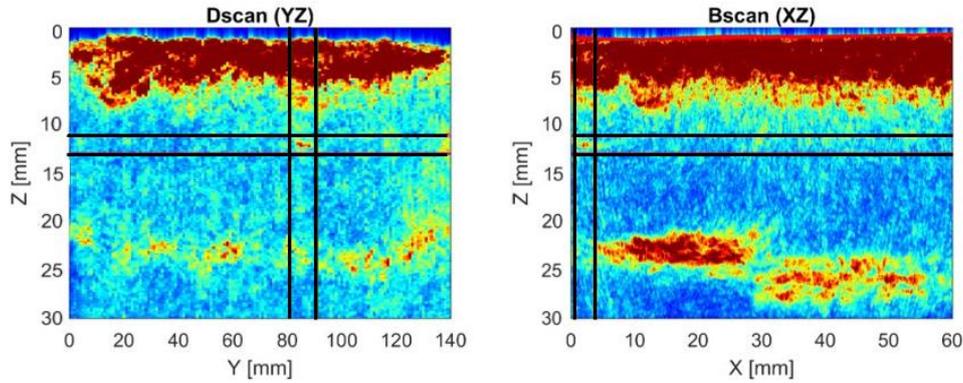


Figure 5-17 : inspection depuis la surface brute du mur multicordon WAAM considéré dans ces travaux.

En Figure 5-17, il convient tout d'abord de noter que le niveau de bruit des données est augmenté, ce qui est attendu du fait des irrégularités de la surface ainsi que des caractéristiques de la sonde. En particulier, l'écho de surface atteint les 5 premiers millimètres en dessous de la surface. Concernant le Bscan, une variation de profondeur de l'écho de fond est observée : de  $Z=47$  mm pour  $X \in [0 \text{ mm} . 30 \text{ mm}]$  à  $Z=50$  mm pour  $X \in ]30 \text{ mm} . 60 \text{ mm}]$ . Ces échos de fond correspondent respectivement à la zone usinée et la zone laissée brute de l'autre surface du mur – voir vue de face du spécimen en Figure 5-16.a. Par ailleurs, un réflecteur est détecté aux coordonnées  $\{ X = 5 \text{ mm}, Y = 85 \text{ mm}, Z = 37 \text{ mm} \}$ . Il convient de noter que ce réflecteur a également été relevé dans les radiographies effectuées dans la Section 4.2. Afin de poursuivre la démarche et de dimensionner ce défaut, il serait nécessaire de conduire une étape de calibration sur la sonde utilisée et la configuration de mesure.

### 3. Perspectives

Dans cette section, une stratégie de *monitoring* de la santé matière entre les phases de dépôt est proposée à partir de la méthode de mesure TFM sélectionnée dans ces travaux. Les résultats présentés montrent que la méthode de mesure peut être compatible avec les états de surface bruts latéraux rencontrés en WAAM, ce qui permet, pour des pièces à surfaces latérales planes, de s'affranchir de l'étape d'usinage de la surface usuellement préalable à la mesure. Il sera nécessaire de poursuivre les investigations sur d'autres pièces WAAM pour valider la robustesse de ce résultat et proposer un critère de rugosité maximal admissible pour la mise en œuvre de la mesure.

Le développement d'un montage de la sonde sur le bras du robot, permettant son déplacement automatique sur la surface de la pièce, constitue un prochain verrou technologique à traiter pour implémenter la stratégie de *monitoring* proposée. Concernant la mise en œuvre du contrôle entre les phases de dépôt, un verrou scientifique majeur réside dans la faisabilité de la mesure ultrasonique sur des pièces à hautes températures. En ce sens, une température maximale admissible de  $350^{\circ}\text{C}$  a été identifiée dans la littérature pour l'utilisation de l'élément couplant *water wedge* [Marvasti 2014].

Par ailleurs, il est nécessaire d'investiguer les variations de vitesse des ondes induites par l'élévation de la température et de les prendre en compte dans le traitement des données [Sukumaran 2009, Rieder 2015]. Dans le cadre de nos travaux, le recours à la stratégie de *monitoring* thermique développée au Chapitre 2 permettrait de contrôler le démarrage du scan ultrasonique et de respecter la plage de température compatible avec la mesure ultrasonique [Chabot 2019].

## V. Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode de mesure applicable aux procédés LMD et WAAM a été proposée et particulièrement illustrée sur les procédés LMD et WAAM, dans l'optique d'être intégrée dans une stratégie de *monitoring* de la santé matière. Dans le cas du WAAM, la méthode de mesure proposée permet de détecter des défauts de tailles entre 0,6 et 1 mm pour les pièces en aluminium. L'applicabilité de la méthode a été montrée sur plusieurs composants, d'un mur multicordon jusqu'à une pièce industrielle de grande échelle. La principale contribution de ces travaux réside dans la preuve de faisabilité d'une mesure sur un état de surface brut de fabrication WAAM, pour des pièces de surfaces latérales planes. Cette faisabilité permet de s'affranchir de la nécessité d'usiner la pièce avant de mettre en œuvre le contrôle ultrasonique et ouvre la voie vers une intégration d'un contrôle CND dans la gamme de fabrication et un suivi de la santé matière de la pièce entre les phases de dépôt.

A partir des travaux menés, des défis restent à relever pour développer une stratégie complète de *monitoring* de la santé matière. La piste de *monitoring* en temps réel, non abordée dans le cadre de la thèse mais restant un objectif à poursuivre, sera investiguée dans de futurs travaux.

# Chapitre 6 : Vers une interaction entre le *monitoring* et la simulation numérique

## I. Introduction

Ce chapitre explore la piste numérique comme support de la méthodologie de *monitoring* proposée dans ces travaux. Dans le prolongement des développements de *monitoring* ayant fait l'objet des précédents chapitres, la simulation numérique peut apporter sa contribution dans la maîtrise des procédés DED. En effet, comme rappelé en Figure 6-1, la simulation permet d'optimiser les paramètres opératoires en amont de la fabrication et peut également seconder le *monitoring* dans l'ajustement de la stratégie de fabrication en temps réel.

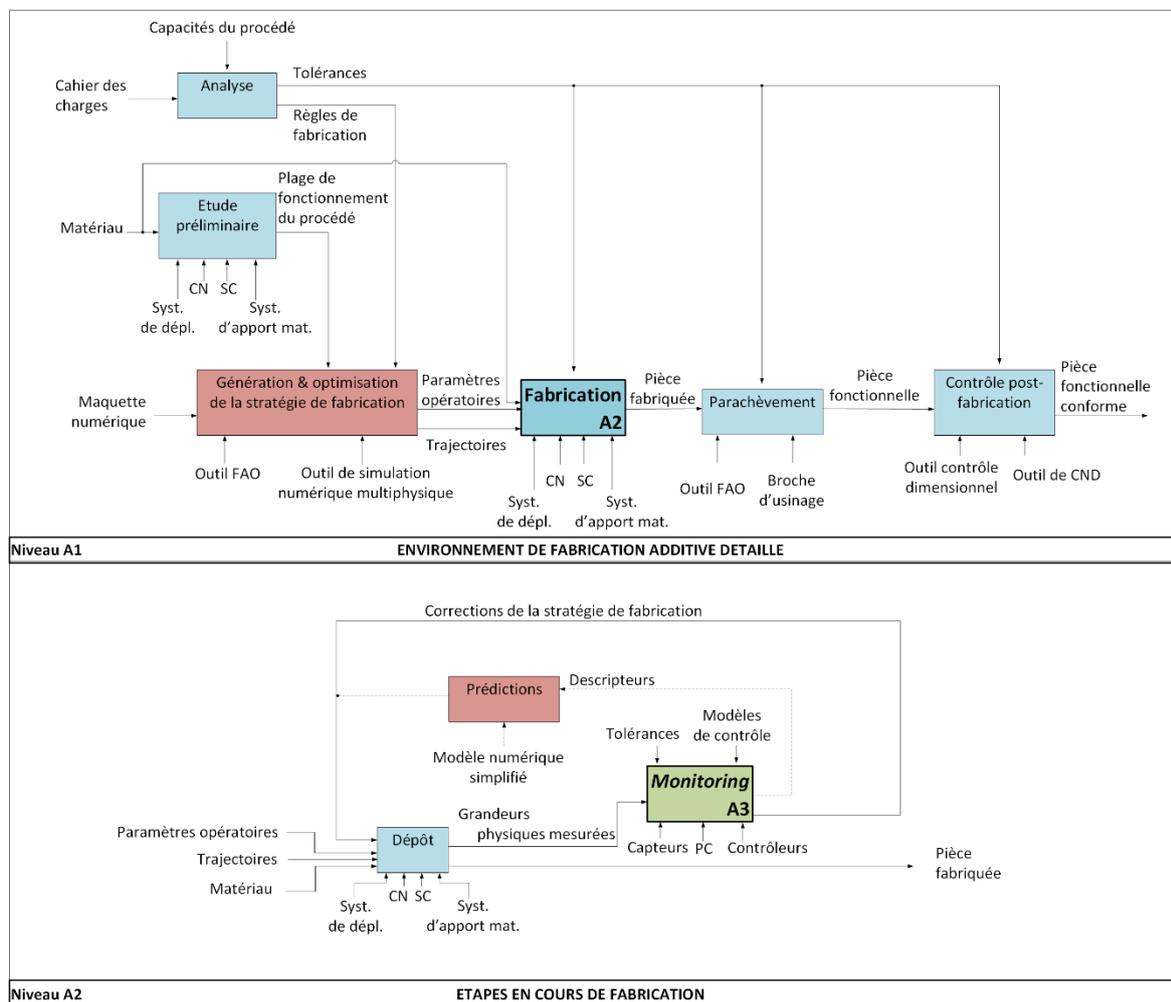


Figure 6-1 : intégration visée de la simulation numérique dans un environnement de fabrication DED.

Dans l'optique d'une intégration conjointe de la simulation avec notre méthodologie de *monitoring*, le potentiel offert par certains outils numériques existants a été investigué dans ce chapitre. En ce sens, les outils numériques choisis sont comparés selon la démarche illustrée en Figure 6-2. Dans cette démarche, une étape préliminaire consiste à évaluer les logiciels retenus sur la simulation de cas simples et industriels. L'issue de cette étape préliminaire peut mener à l'identification d'un ou plusieurs outil(s) numérique(s) pertinent(s) pour aider le *monitoring*. L'intégration de l'outil peut être menée en amont de la fabrication, à des fins d'optimisation de la stratégie de fabrication, ou en réalisant des simulations directement en temps réel, en parallèle du *monitoring*. Si le logiciel le permet, une intégration peut s'envisager dès l'étape de conception, afin d'optimiser la géométrie de la pièce au regard des prédictions des contraintes résiduelles générées par la fabrication.

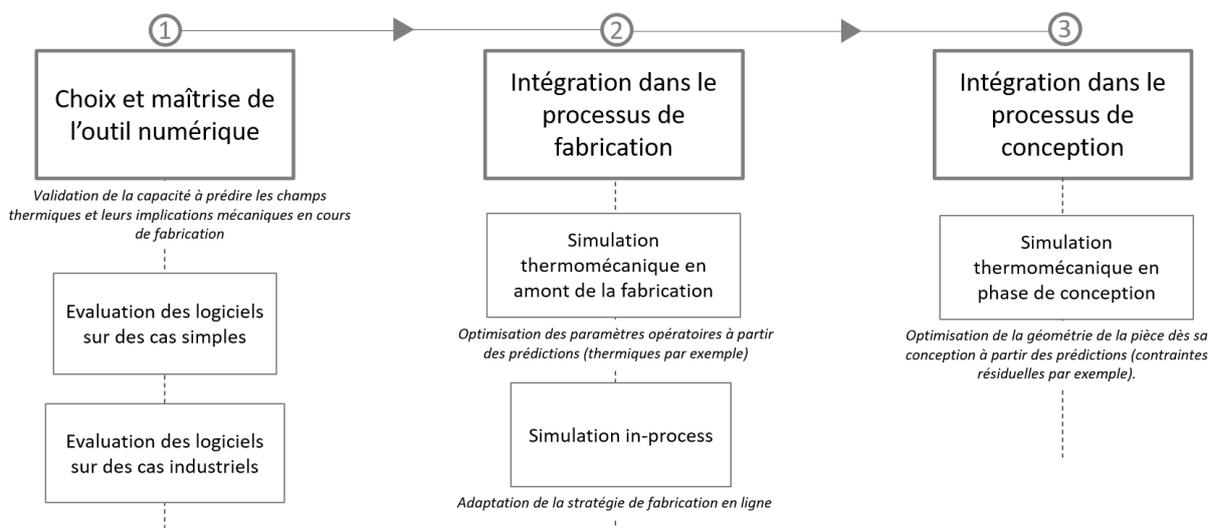


Figure 6-2 : démarche d'intégration d'un outil numérique dans un environnement de Fabrication Additive DED.

Ces travaux concernent principalement le procédé WAAM, cependant la démarche peut être appliquée de la même manière à d'autres procédés DED, comme le LMD. Ce chapitre présente une comparaison des prédictions de différents logiciels de simulation thermomécanique Eléments Finis (EF) avec des données expérimentales issues du *monitoring*. Les logiciels sont tout d'abord comparés sur un cas de géométrie simple. Par la suite, une piste de prédiction des temporisations à partir des résultats numériques, dans l'optique de seconder le *monitoring* thermique développé dans ces travaux, est investiguée. Cette partie des travaux a fait l'objet d'une présentation à la Conférence *MUGV & Manufacturing'21* 2018 [Chabot 2019]. Enfin, face à l'enjeu de maîtriser la fabrication de cas industriels, l'applicabilité des méthodes numériques et le recours au calcul intensif pour la simulation de ce type de composants sont discutés en fin de chapitre. Cette partie des travaux a été menée avec les ressources de l'Institut de Calcul Intensif de Centrale Nantes sur le supercalculateur Liger, et a été supportée par une subvention de l'Institut de Calcul Intensif sous le projet EA1904240/2019.

## II. Positionnement du chapitre

### 1. Etat de l'art de la simulation thermomécanique des procédés DED

La Figure 6-3 présente les différents types de logiciels EF applicables à la simulation numérique des procédés DED. Il est possible de distinguer :

- les logiciels généralistes, permettant de simuler un large panel de procédés [Liu 2015]. De par leurs fonctions de mise en données peu adaptées à ces procédés et les temps de calculs élevés, ils sont généralement employés pour simuler la fabrication de pièces de petites dimensions et à faible nombre de couches [Biegler 2018, Hejripour 2019, François 2019] ;
- du fait du déploiement en industrie des procédés basés sur la technologie Lit de Poudres – SLM principalement –, de nombreux outils numériques dédiés ont été développés [Van Belle 2012]. Ces outils mettent en œuvre des méthodes simplifiées afin d'optimiser les temps de calcul et de permettre la simulation de pièces complexes, à nombre de couches élevé. Cependant, du fait des différences de mise en œuvre entre les procédés DED et SLM, les outils numériques développés pour le procédé SLM peuvent difficilement être appliqués à la simulation DED ;
- les procédés DED pouvant être assimilés à du soudage « multi passes », des logiciels destinés à la simulation numérique du soudage (SNS) peuvent être employés [Ding 2011, Michaleris 2014]. Cependant, il est possible de se questionner sur la pertinence des phénomènes physiques simulés et des méthodes numériques de ce type de logiciels par rapport au fonctionnement des procédés DED [François 2019] ;
- du fait de la relative jeunesse des technologies DED, le paysage des logiciels dédiés est encore en pleine expansion. Des logiciels comprenant des fonctions de mise en données adaptées au caractère additif de ces procédés et des méthodes numériques simplifiées commencent à apparaître [Denlinger 2015, Li 2019]. Cependant, comme nous le verrons par la suite, un consensus sur les méthodes numériques à employer et les physiques à simuler ne semble pas encore avoir été trouvé.

GÉNÉRALISTES	SIMULATION « POUDRE »	SIMULATION SOUDAGE	SIMULATION « DED »
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ MSC Marc</li> <li>▪ Abaqus (plug-in FA)</li> <li>▪ Ansys</li> <li>▪ ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Virfac AM/iAM (GeonX)</li> <li>▪ Additive Print (ANSYS)</li> <li>▪ Simufact Additive (MSC)</li> <li>▪ Additive Manufacturing (ESI)</li> <li>▪ 3DXpert (3DSYSTEMS)</li> <li>▪ Netfabb (Autodesk)</li> <li>▪ ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Virfac Welding Designer (GeonX)</li> <li>▪ Simufact Welding (MSC)</li> <li>▪ ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Netfabb (Autodesk)</li> <li>▪ Additive Manufacturing (ESI)</li> <li>▪ Virfac – module WAAM (GeonX)</li> <li>▪ ...</li> </ul>

Figure 6-3 : logiciels identifiés pour la simulation numérique des procédés de Fabrication Additive métallique.

La majorité des études numériques relevées dans la littérature ont été menées avec les logiciels généralistes ou de simulation du soudage. Cependant, à cause des problématiques de mise en données et de temps de calcul, le champ d'application de ces études est souvent limité à des géométries simples, de faibles dimensions et composées de quelques couches [Michaleris 2014, Biegler 2018, Hejripour 2019]. A notre connaissance, seul Ding *et al.* ont appliqué les méthodes EF classiques à la prédiction thermomécanique d'une pièce de grandes dimensions [Ding 2011].

Peu de solutions sont actuellement proposées dans la littérature pour aider à l'optimisation de la stratégie de fabrication DED à partir de résultats numériques. La seule étude identifiée en ce sens propose une méthode de détermination de la temporisation à chaque couche pour garantir le refroidissement de la pièce à une température souhaitée [Montevicchi 2018]. La méthode, illustrée en Figure 6-4, consiste à prédire un temps de refroidissement avec un modèle dédié à partir de l'évolution thermique simulée par EF. Cette méthode numérique est prometteuse. Cependant, afin d'être efficace, elle doit se baser sur des prédictions quantitatives des champs thermiques, ce qui pose de réels défis, comme nous le verrons par la suite.

Nous avons pu identifier un large paysage logiciel pour simuler les procédés DED. Cependant, les principaux verrous rencontrés actuellement concernent :

- la difficulté d'établir un consensus sur les méthodes numériques à employer pour simuler les procédés DED :
  - la difficulté de réaliser des simulations thermomécaniques fiables sur des cas industriels, ce dans des temps de calcul raisonnables ;
- la faisabilité d'interaction entre la simulation numérique et les stratégies de *monitoring*, notamment concernant l'automatisation de la chaîne numérique, et la compatibilité du temps de calcul compatible avec une utilisation en temps réel.

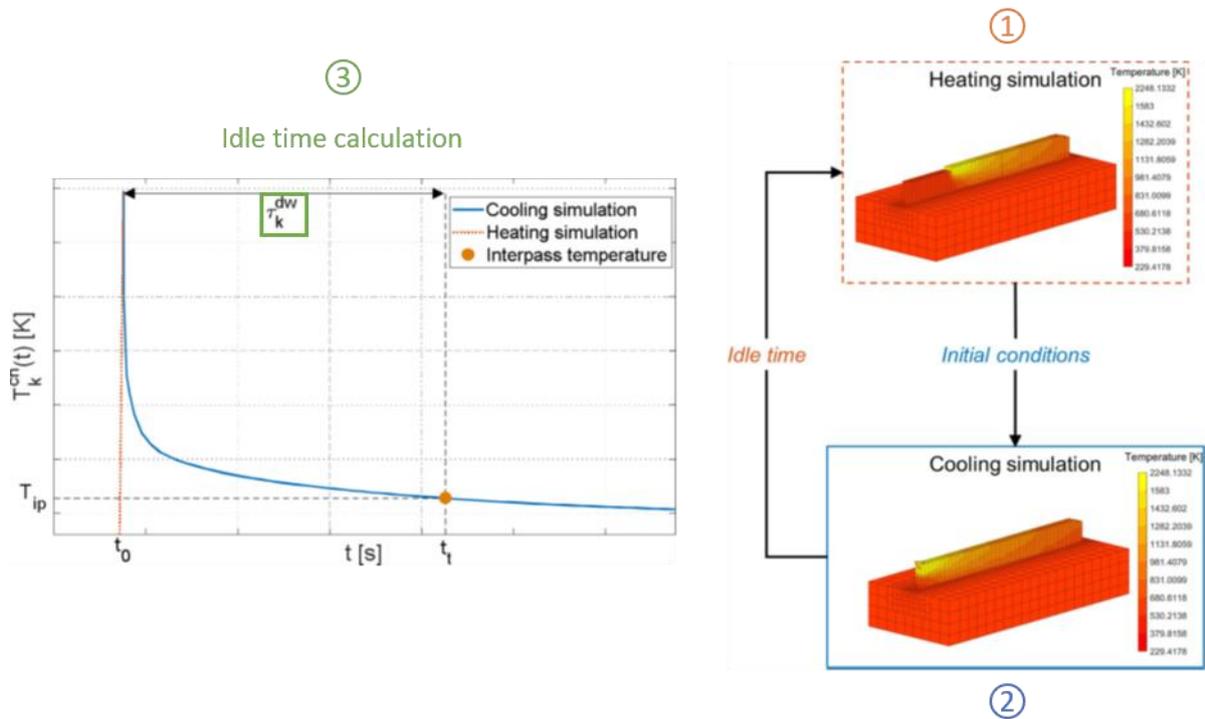


Figure 6-4 : illustration de la méthode de sélection de temporisations par Montevecchi et al. [Montevecchi 2018].

## 2. Objectifs et cadre du chapitre

Au regard de l'état de l'art présenté dans la section précédente, nous proposons d'orienter ces travaux sur les axes suivant :

- l'évaluation du potentiel offert par les nouveaux outils de simulation dédié aux procédés DED par rapport aux outils de simulation classiques ;
- l'application de(s) outil(s) numérique(s) retenu(s) à la prédiction des temporisations entre couches vers une interaction entre les approches numérique et de *monitoring*.

En ce sens, ces travaux se concentrent sur les outils de simulation numérique du soudage et de nouveaux outils dédiés aux procédés DED. En particulier, à travers des collaborations avec des éditeurs de logiciels, deux outils de simulation thermomécanique sont considérés :

- la version 8 de Simufact Welding (SW), logiciel thermo-métallo-mécanique de MSC Software, orienté SNS,
- la version 2019 de NetFabb Local Simulation (NLS), logiciel thermomécanique simplifié d'Autodesk, dédié aux procédés DED et SLM.

Pour chaque logiciel, le déroulé des simulations complètes utilisées dans ces travaux sont illustrées en Figure 6-5.

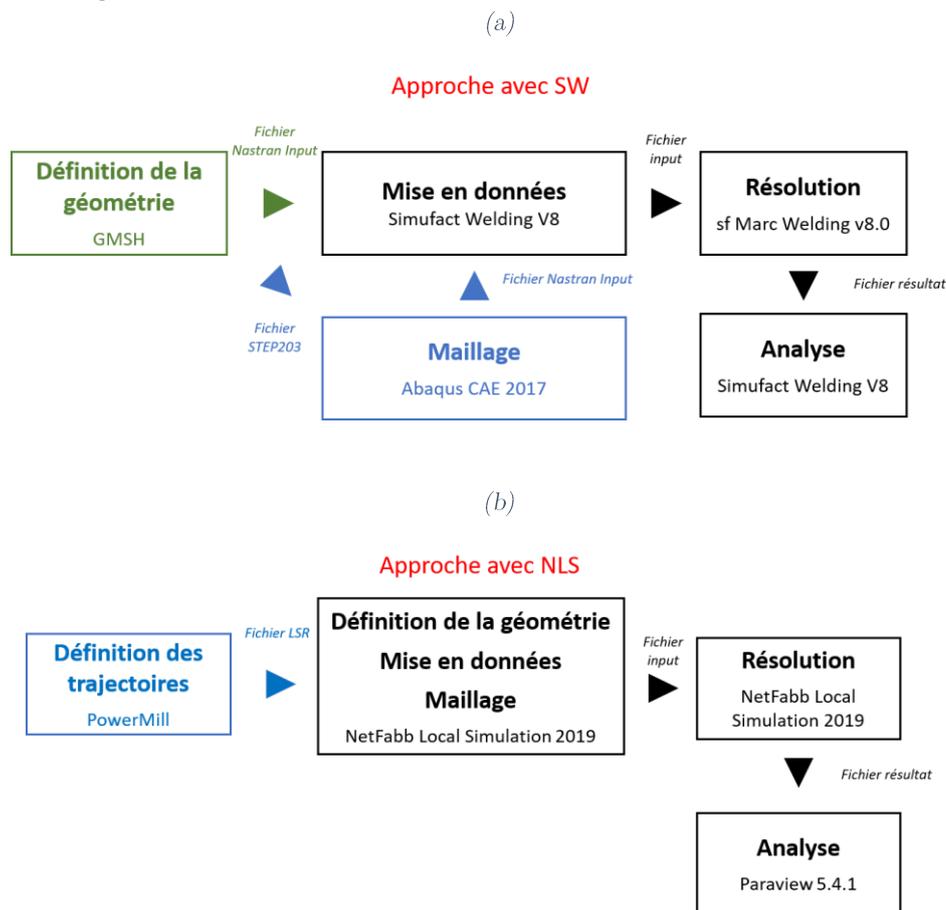


Figure 6-5 : processus de simulation numérique avec (a) Simufact Welding, (b) NetFabb Local Simulation.

La méthode de simulation utilisée pour Simufact Welding est décrite en Figure 6-5.a. La création des géométries et le maillage des différentes entités – cordons, substrat – sont menés avec des logiciels tiers, ici GMSH et Abaqus, afin de maîtriser le raffinement du maillage. L’interface de visualisation dans SW est utilisée pour analyser les résultats à tout moment de la simulation. Concernant NLS - voir en Figure 6-5.b -, certaines fonctions de mise en données ont été modifiées ou simplifiées pour s’adapter aux procédés DED. D’une part, la définition des couches du modèle se fait par l’intermédiaire d’un fichier « LSR » contenant les trajectoires ainsi que les caractéristiques de la source de chaleur. Ce fichier « LSR » peut être construit manuellement ou directement généré à partir de Powermill, logiciel FAO du même éditeur. D’autre part, la modélisation du substrat fait l’objet d’une fonction dédiée dans NLS. L’étape de maillage est nécessairement menée avec le logiciel NLS et sa méthode de maillage adaptatif [Li 2019]. Les résultats finaux sont analysés avec le logiciel tiers Paraview.

Les deux logiciels testés dans le cadre de cette étude proposent des méthodes de simulation différentes. Les différentes caractéristiques des logiciels sont détaillées ci-dessous et résumées dans le Tableau 6-1 :

- **la mise en données** : sous SW, la démarche de mise en données est rendue possible par la compatibilité des softs à travers les formats de fichier. Par ailleurs, l'utilisation de logiciels libres et scriptables comme Paraview et GMSH permet l'automatisation de la simulation pour une mise en œuvre conjointe au *monitoring*. Dans le cas de NLS, toute la chaîne numérique est comprise dans une même suite de logiciels, ce qui rend le processus de simulation linéaire ;
- **le maillage** : le logiciel SW se base sur des maillages conformes, ce qui rend l'étape de maillage des modèles non triviale et limite les perspectives de remaillage du modèle en cours de simulation. L'utilisation d'un maillage non conforme dans NLS permet une plus grande liberté pour mailler un large panel de pièce, ainsi qu'un remaillage automatique de la pièce en cours de simulation [Li 2019] ;
- **les phénomènes physiques simulés** : dans NLS, seule la convection est considérée pour modéliser les conditions aux limites thermiques du modèle, là où SW modélise les pertes par convection et radiation. L'hypothèse de négliger les pertes par rayonnement implique une simplification de la résolution et une réduction du temps de calcul. Ainsi, il convient de questionner la pertinence de prendre en compte le rayonnement pour simuler les procédés DED [François 2019] ;
- **le couplage thermomécanique** : la simulation thermomécanique sous SW est à couplage fort – les interactions des sollicitations mécaniques sur les champs thermiques sont prises en compte à chaque pas de temps – et à couplage faible dans NLS – les interactions de la mécanique sur les champs thermiques sont négligés et la résolution mécanique est effectuée dans un second temps. La considération d'un couplage faible mène à une réduction significative du temps de calcul.

Le logiciel NLS semble être plus adapté à une implémentation dans le processus de fabrication – mise en données linéaire et méthodes numériques simplifiées. Cependant, les hypothèses simplificatrices choisies par NLS ne doivent pas être au détriment de la qualité des prédictions. Au travers des études présentées dans ce chapitre, nous allons évaluer l'impact des hypothèses simplificatrices de NLS sur les prédictions par rapport à des méthodes numériques plus classiques telles que celle mise en œuvre dans SW.

Tableau 6-1 : caractéristiques des logiciels considérés.

	SW v.8	NLS v.2019
Mise en données	- Imports de la géométrie et du maillage à partir de logiciels compatibles - Définition des trajectoires en interne	- Création géométrie et maillage en interne  - Import des trajectoires à partir de logiciels Autodesk
Type de maillage	Conforme	Non conforme
Phénomènes thermiques simulés	Convection Radiation	Convection
Simulation thermomécanique	Couplage fort	Couplage faible

### III. Comparaison des logiciels sur la simulation thermomécanique du procédé WAAM

#### 1. Introduction

De par les différentes modélisations utilisées par les logiciels retenus, la comparaison des deux parait non triviale. Ainsi, il est proposé de les comparer sur un cas expérimental, avec un ajustement des coefficients de conditions aux limites de façon à reproduire au mieux les mesures à disposition.

#### 2. Présentation du cas d'étude

Le cas d'étude considéré dans cette section est la simulation du dépôt WAAM d'un mur en acier duplex, de 180 mm de long et de 12 couches, sur un substrat encastré d'un côté et laissé libre de l'autre.

Ce cas expérimental est choisi de manière à provoquer une déformation significative du substrat et ainsi évaluer les capacités des logiciels en termes de prédictions mécaniques. Le cas d'étude est schématisé en Figure 6-6 et les caractéristiques du mur sont détaillées en Tableau 6-2.

Tableau 6-2 : caractéristiques du mur considéré pour la comparaison des logiciels sur la simulation thermomécanique du procédé WAAM.

Matériau du substrat	S355
Matériau déposé	Acier inoxydable Duplex
Nombre de couches	12

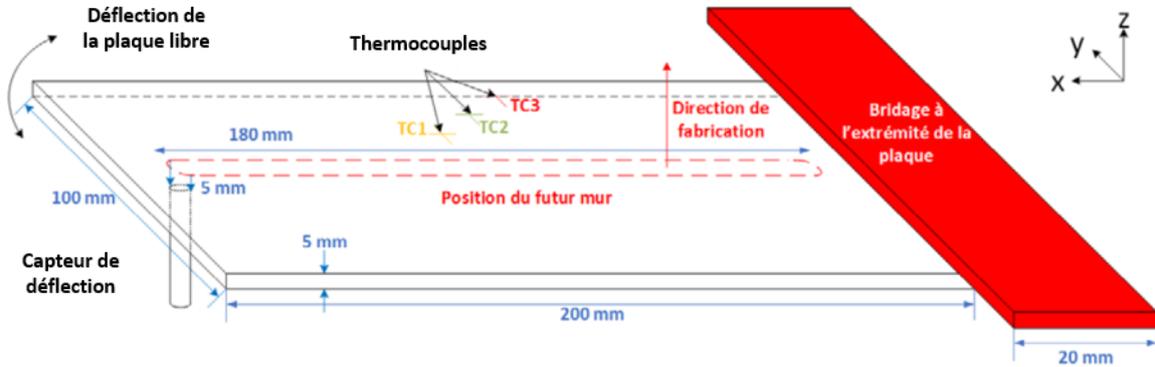


Figure 6-6 : schématisation du cas d'étude de simulation thermomécanique du procédé WAAM.

La réalisation expérimentale du cas d'étude a été menée dans la cellule multiprocédé à l'Ecole Centrale de Nantes. Le montage expérimental est illustré en Figure 6-7. Une caméra thermique infrarouge est placée à 500 mm de la zone de dépôt afin de mesurer les champs thermiques dans l'ensemble de la pièce. Afin d'avoir des données thermiques au niveau du substrat, trois thermocouples sont insérés dans des perçages, respectivement à 15 mm, 25 mm et 35 mm du bord du mur. Enfin, un profilomètre laser placé en-dessous du substrat permet de mesurer sa déflexion en cours de fabrication. Les paramètres opératoires utilisés pour la fabrication du mur sont reportés en Tableau 6-3. Le mur final est illustré en Figure 6-8. Le déplacement vertical – ci-après nommé déflexion – est mesuré après refroidissement à température ambiante et évalué à 18 mm en bord de substrat.

Tableau 6-3 : paramètres opératoires utilisés pour fabriquer le mur monocordon WAAM considéré pour la comparaison des logiciels.

TS	700 mm/min
WFS	7,2 m/min
P	3460 W
Temporisation entre couches	100 s

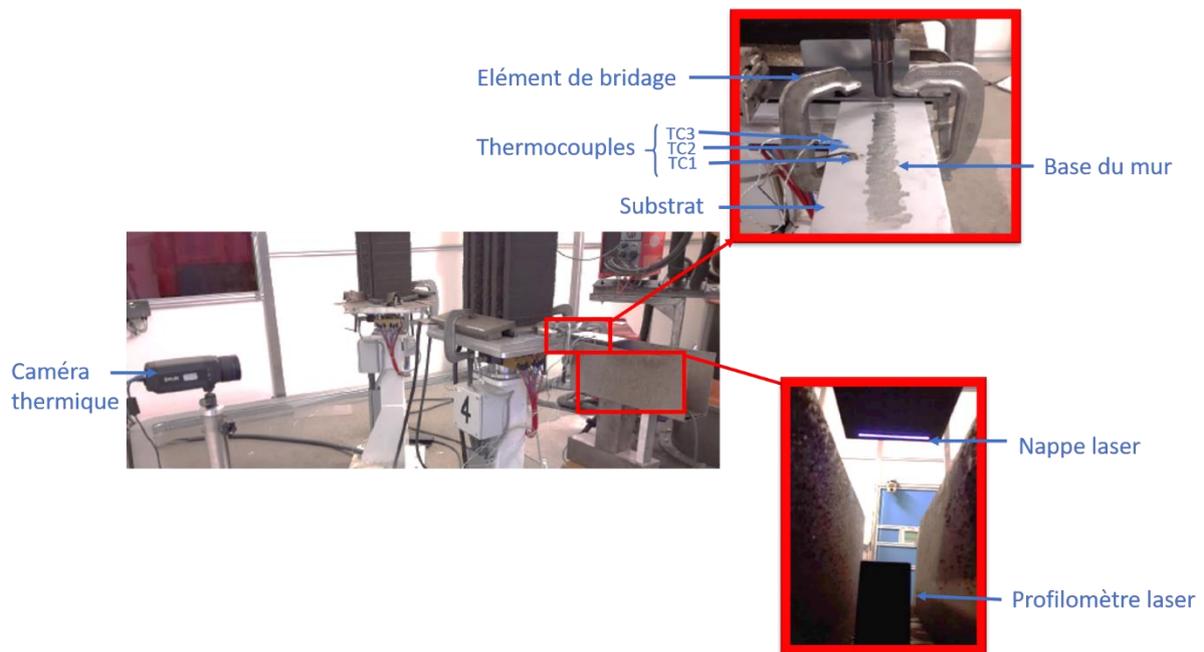


Figure 6-7 : montage expérimental de la fabrication du mur considéré pour la comparaison des logiciels.



Figure 6-8 : mur multi-cordons fabriqué en WAAM pour la comparaison des logiciels.

Un échantillon pris au milieu du mur est poli puis attaqué à l'acide oxalique pendant 10 s. A partir d'une macrographie au microscope à variation focale, les profils de Zone Fondue (ZF) et de Zone Affectée Thermiquement (ZAT) sont mesurés. Concernant les données expérimentales recueillies par la caméra thermique, nous considérons l'évolution de température d'un même pixel, correspondant à un point de la 6<sup>e</sup> couche du mur. Parmi les mesures au substrat, l'évolution thermique au thermocouple TC1 – voir Figure 6-6 – est particulièrement étudiée. Enfin, les données du profilomètre sont traitées de façon à obtenir l'évolution de la déflexion d'un point au milieu de la nappe du profilomètre, correspondant à un point sous le mur à 10 mm du bord libre – voir Figure 6-6. L'ensemble des données expérimentales précédemment décrites servira à confronter les résultats numériques dans la Section III.4.

### 3. Mise en données

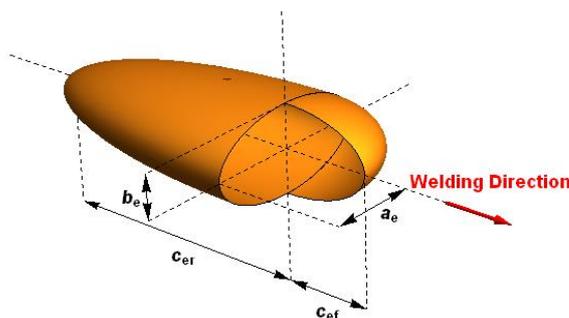
Des données matériaux thermo-dépendantes confidentielles fournies par Naval Group sont utilisées pour modéliser le comportement de l'Acier Duplex pour les cordons déposés. Dans NLS, la simulation bi-matériau n'étant pas disponible dans la version à disposition, ces données matériaux sont affectées à l'ensemble du modèle. Dans SW, des données matériaux de l'acier S355 issues de la base de données SW sont utilisées pour le substrat. Les données matériaux du Duplex et du S355 ayant des ordres de grandeur similaires, les effets de ce changement de matériau sur les prédictions thermomécaniques sont considérés comme négligeables.

Par simplicité, un maillage hexaédral est utilisé dans les deux modèles SW et NLS. Les dimensions du cordon simulé sont fixées à 7 mm de largeur et 1,9 mm de hauteur. Dans le modèle SW, les cordons ainsi que la zone autour du mur sont raffinés avec des éléments de 2 mm de longueur et 0,5 mm de largeur. Des éléments de 2 mm de côté constituent le maillage du substrat. Dans le modèle NLS, la stratégie de maillage adaptatif est définie de telle sorte que les trois dernières couches déposées soient maillées avec une taille d'élément de l'ordre de 0,5 mm et d'environ 2 mm pour le maillage du substrat [Li 2019]. Contrairement à SW où les éléments des couches non déposées sont inactifs, une méthode d'activation d'éléments hybride est utilisée dans NLS [Li 2019]. Quel que soit le logiciel, les éléments sont activés au passage de la source de chaleur en cours de simulation.

Une source de chaleur équivalente double-ellipsoïde est sélectionnée pour modéliser l'apport de chaleur de l'arc électrique [Goldack 1984]. La paramétrisation de la source de chaleur équivalente est détaillée en Tableau 6-4 et sera évaluée avec les profils expérimentaux de ZAT et la ZF mesurés sur macrographie. Les conditions aux limites thermiques, décrites en

Tableau 6-5, sont ajustées afin de reproduire au mieux les résultats expérimentaux produits par la caméra thermique. Comme indiqué dans la présentation des logiciels – voir Section II.2. -, le logiciel NLS néglige les pertes de chaleur par rayonnement.

Tableau 6-4 : paramètres de modélisation de la source de chaleur équivalente.



<b>Puissance nominale</b>	3460 W
<b>Rendement</b>	85 %
<b><math>a_e</math></b>	3,5 mm
<b><math>b_e</math></b>	2,5 mm
<b><math>c_{ef}</math></b>	2,5 mm
<b><math>c_{er}</math></b>	5 mm

Tableau 6-5 : conditions aux limites thermiques utilisées dans cette étude.

	SW	NLS
Convection	20 W/m <sup>2</sup> /K	25 W/m <sup>2</sup> /K
Rayonnement	0,7	Négligé

Concernant les conditions aux limites mécaniques dans SW, le bridage d'un côté de la plaque substrat est illustré en Figure 6-9.a. Le bridage est réalisé par le biais d'une contrainte de déplacement en Z de trois points de chaque arête latérale. Parmi les douze points contraints, l'un possède une fixation en X et Y supplémentaire et son opposé seulement en Y afin de bloquer les mouvements de corps rigides. Dans NLS, les possibilités de bridages sont définies par des fonctions spécifiques. Dans le cas présent, la fonction « *Cantilevered* » est utilisée pour encasturer la surface latérale du modèle illustrée en Figure 6-9.b. Pour les deux logiciels, le bord opposé du substrat est laissé libre de contrainte. Le pas de temps est calculé à 0,17 s en phase de dépôt, de manière à ce que chaque incrément corresponde à l'activation d'un élément du cordon. La démarche de calcul du pas de temps est explicitée dans l'Equation 6-1. Pour les phases de refroidissement, la gestion du pas de temps est automatique par le logiciel.

$$pas = \frac{t_{dépôt\ cordon}}{nb_{elt/cordon}}, \text{ avec } \begin{cases} t_{dépôt\ cordon} = \frac{l_{cordon}}{TS} = \frac{180 \cdot 60}{700} = 15\ s \\ nb_{elt/cordon} = \frac{l_{cordon}}{l_{elt}} = 360 \end{cases} \quad \text{Equation 6-1}$$

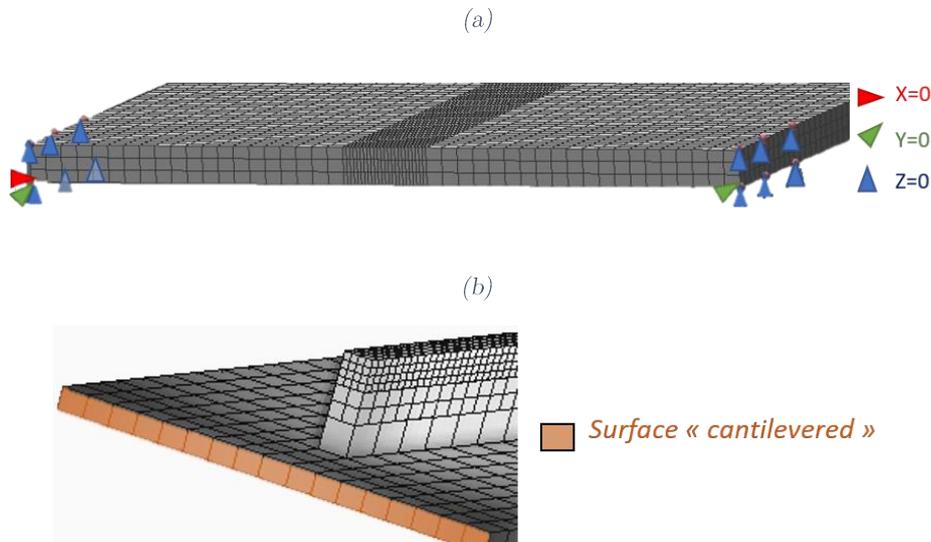


Figure 6-9 : conditions aux limites mécaniques des différents modèles  
(a) SW, (b) NLS.

#### 4. Résultats et discussion

Les calculs SW et NLS ont été menés sur la même machine avec 12 processeurs. Pour chaque logiciel, les temps de calcul de l'analyse thermique seule et de l'analyse thermomécanique sont reportés en Tableau 6-6. Concernant le calcul thermique seul, l'utilisation de méthodes simplifiées proposées par NLS permet de réduire de plus de 90% le temps de calcul par rapport à une simulation EF complète telle que représentée par SW dans ces travaux. Les temps de calcul thermomécanique avec le logiciel NLS peuvent être compatibles avec des exigences industrielles. Dans le cas de l'analyse thermomécanique menée sous SW, des déformations critiques des éléments du maillage ont été rencontrées. Or, la méthode numérique étant basée sur une trajectoire définie indépendamment du maillage – contrairement à NLS –, ces déformations ont empêché l'activation des éléments lors du passage de la source de chaleur équivalente. Ainsi, cette simulation thermomécanique n'a pas pu aboutir.

Tableau 6-6 : temps de calcul pour les différentes simulations du cas d'étude WAAM.

SW *		NLS *	
Analyse thermique	23 h	Analyse thermique	20 min
Analyse thermomécanique	Non convergente	Analyse mécanique	5 h

\* Calculs menés sur la même machine avec 12 processeurs

##### 4.1. Validation de la modélisation de la source de chaleur

La comparaison des profils de ZAT et ZF expérimentales et numériques est illustrée en Figure 6-10. Les dimensions correspondantes sont reportées en Tableau 6-7.

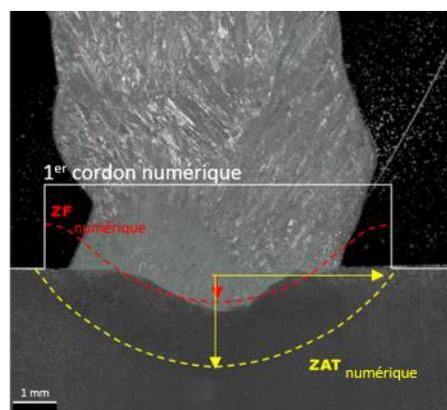


Figure 6-10 : illustration comparaison des Zone Affectée Thermiquement (ZAT) et Zone Fondue (ZF) numériques et expérimentales pour validation de la modélisation de la source de chaleur équivalente.

Tableau 6-7 : dimensions des ZAT et ZF pour les résultats numériques et relevés sur macrographies.

	Zone Affectée Thermiquement (ZAT)		Zone Fondue (ZF)
	Profondeur (mm)	Rayon latéral (mm)	Rayon latéral (mm)
Expérimental	2,56	4,60	1,03
SW	2,7	4,3	0,81
NLS	2,5	3,5	0,9

En Tableau 6-7, les profondeurs des ZAT et ZF obtenues avec les deux modèles sont similaires. Cependant, concernant la simulation conduite sur NLS, le rayon de la ZAT est inférieur au rayon simulé avec SW ainsi que celui mesuré expérimentalement. La cause de cette divergence n'a pas été identifiée. Mis à part le point précédemment évoqué, les champs thermiques simulés avec NLS et SW sont en accord avec ceux relevés sur la macrographie, avec moins de 15% d'erreur. Ainsi, la paramétrisation de la source de chaleur équivalente utilisée sera conservée dans toutes les simulations présentées dans ce chapitre.

#### 4.2. Analyse thermique

Tout d'abord, les résultats thermiques obtenus avec NLS et SW sont comparés avec les données expérimentales au niveau du mur déposé en Figure 6-11. La comparaison est réalisée au niveau d'un point situé au milieu de la 6<sup>e</sup> couche du mur.

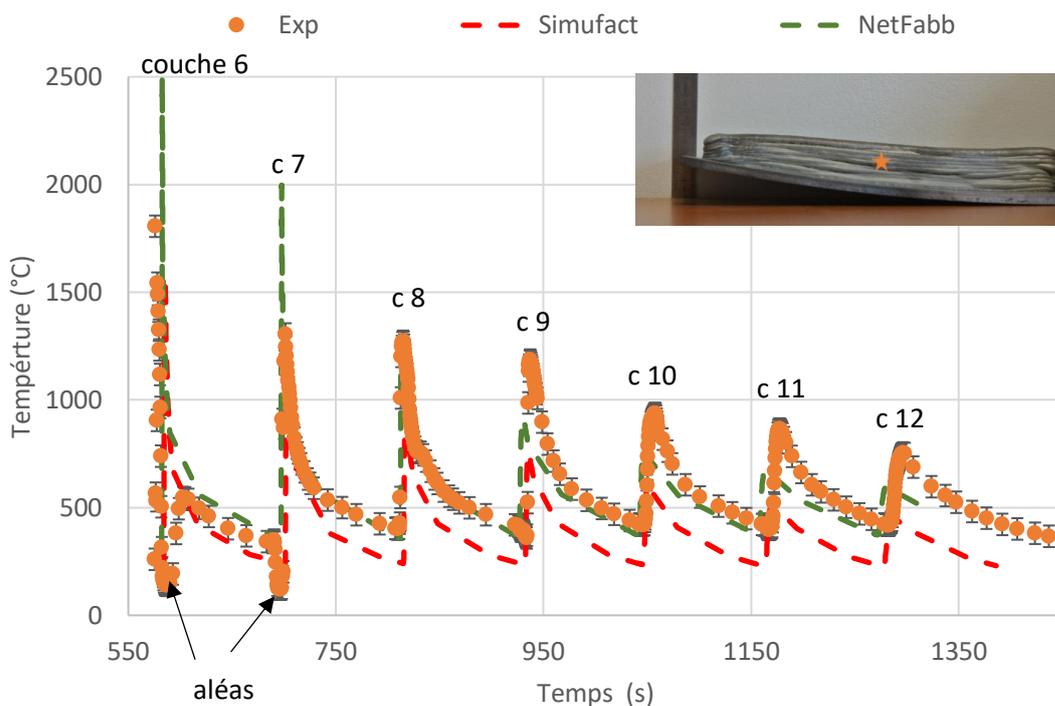


Figure 6-11 : comparaison des évolutions de température à la 6<sup>e</sup> couche déposée entre les simulations et les données de la caméra thermique.

En Figure 6-11, le premier pic correspond au dépôt de la couche d'intérêt et les autres pics correspondent aux sollicitations thermiques subies par cette même couche lors des dépôts suivants. Nous pouvons noter une décroissance des pics attendue du fait de l'éloignement progressif de l'arc électrique pour le dépôt des couches suivantes. Concernant les données de la caméra thermique, les minima locaux observés pour les deux premières couches sont des aléas liés à l'obtention des valeurs à partir des images thermiques. En effet, ces données expérimentales ont été obtenues à partir d'un même pixel considéré dans chaque image thermique, qui peut pointer ponctuellement vers le fond au-dessus des cordons déposés à cause des déflexions du substrat. Ces déflexions peuvent également engendrer de légères variations dans les mesures pour les couches suivantes.

Compte tenu de l'ajustement des coefficients de pertes de chaleur, les deux modélisations permettent de décrire qualitativement l'évolution thermique expérimentale. Dans l'ensemble, nous pouvons noter que les températures simulées avec NLS sont supérieures à celles simulées avec SW et plus en accord avec les données mesurées. Cependant, les températures maximales des premières couches sont supérieures aux températures relevées par la caméra thermique et très au-dessus du point de fusion de l'acier, ce qui tendrait à questionner la pertinence de la calibration de la source de chaleur choisie.

La Figure 6-12 présente la comparaison des prédictions thermiques avec les données expérimentales au substrat, à la position du thermocouple TC1 – voir Figure 6-7. Les variations observées sur chaque courbe de la Figure 6-12.a correspondent aux sollicitations thermiques subies par le substrat pour le dépôt des 12 couches du mur. Concernant les mesures expérimentales, des pics locaux sont observés dans les phases de chauffe des couches 3 à 12. Ces pics sont identifiés comme liés au rayonnement de l'arc électrique qui éclaire localement le thermocouple lors de son passage au-dessus de ce dernier. En effet, étant donné les distances et les données matériaux, l'échelle de temps des pics – inférieure à 20 s – est sans doute trop rapide pour être la conséquence de la dissipation de chaleur par convection ou par conduction dans le substrat. De plus, la symétrie de la forme du pic en fonction de la couche déposée, mise en évidence avec les pics des couches 11 et 12 en Figure 6-12.b et Figure 6-12.c., laisse supposer une dépendance à la direction de dépôt, qui n'est sans doute pas associée aux phénomènes de convection et conduction. Ainsi, ces pics sont considérés comme des artefacts qui ne sont pas représentatifs de l'évolution thermique du substrat.

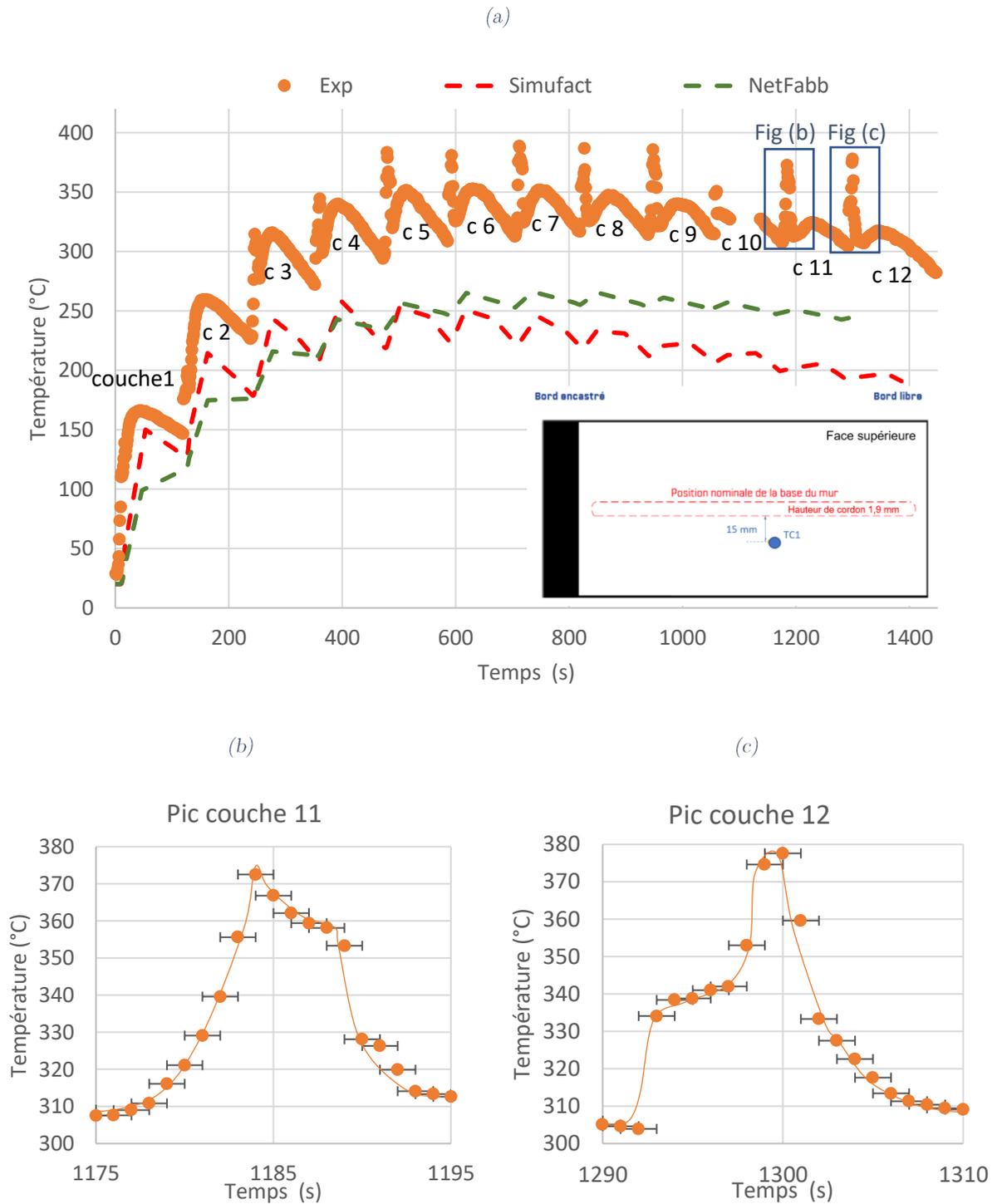


Figure 6-12 : (a) comparaison des évolutions de température dans le substrat entre les simulations et les données thermocouple TC1, zoom sur les données expérimentales au (b) pic de la couche 11, (c) pic de la couche 12.

Il convient de noter que la température du substrat relevée par le thermocouple TC1 se stabilise entre 300 et 350 °C à partir de la 5<sup>e</sup> couche. Concernant les résultats numériques, les deux modèles sont qualitatifs mais sous-estiment la température mesurée à la position du TC1 tout au long de la fabrication. Le modèle réalisé avec SW rend correctement compte des pentes des phases de chauffe et de refroidissement. Cependant dès la 2<sup>e</sup> couche, la température maximale atteinte en phase de chauffe est inférieure à la température mesurée et l'écart avec les mesures expérimentales va augmenter à partir de cette couche-là, pour se stabiliser à 100 °C à partir de la 4<sup>e</sup> couche. Concernant NLS, l'évolution thermique simulée est au-dessus de SW et l'écart avec les données du thermocouple est de l'ordre de 50°C en fin de fabrication. Tout comme avec SW, les pentes des phases de chauffe sont décrites correctement. Les différences d'évolutions relevées entre les deux modélisations, que ce soit au niveau du substrat ou dans le mur, peuvent être liées à la non prise en compte des échanges par rayonnement dans NLS.

#### 4.3. Analyse mécanique

La simulation thermomécanique menée sous SW n'ayant pas convergé pour des raisons de déformations locales critiques du maillage, seuls les résultats de l'analyse thermomécanique avec NLS sont considérés dans cette section. En Figure 6-13, les résultats numériques sont comparés avec la déflexion d'un point situé en-dessous du bord du mur, mesurée avec le profilomètre. Nous pouvons constater une stabilisation de la déflexion mesurée expérimentalement lors du refroidissement des trois premières couches. Pour les couches suivantes, il semble que les temporisations mises en œuvre ne permettent pas de stabiliser la déflexion. Nous pouvons cependant constater un régime permanent dans les variations de déflexion du substrat après la 5<sup>e</sup> couche. La simulation reproduit la tendance expérimentale mais sous-estime les valeurs de déflexion. La déflexion du substrat étant gouvernée par l'état et l'histoire thermique en cours de fabrication, les écarts des résultats numériques observés sont attendus du fait de la prédiction non juste de la température dans le substrat – voir Figure 6-12. Par ailleurs, nous pouvons constater que le comportement du substrat pour les premières couches, précédemment mis en évidence, n'est pas décrit par la simulation.

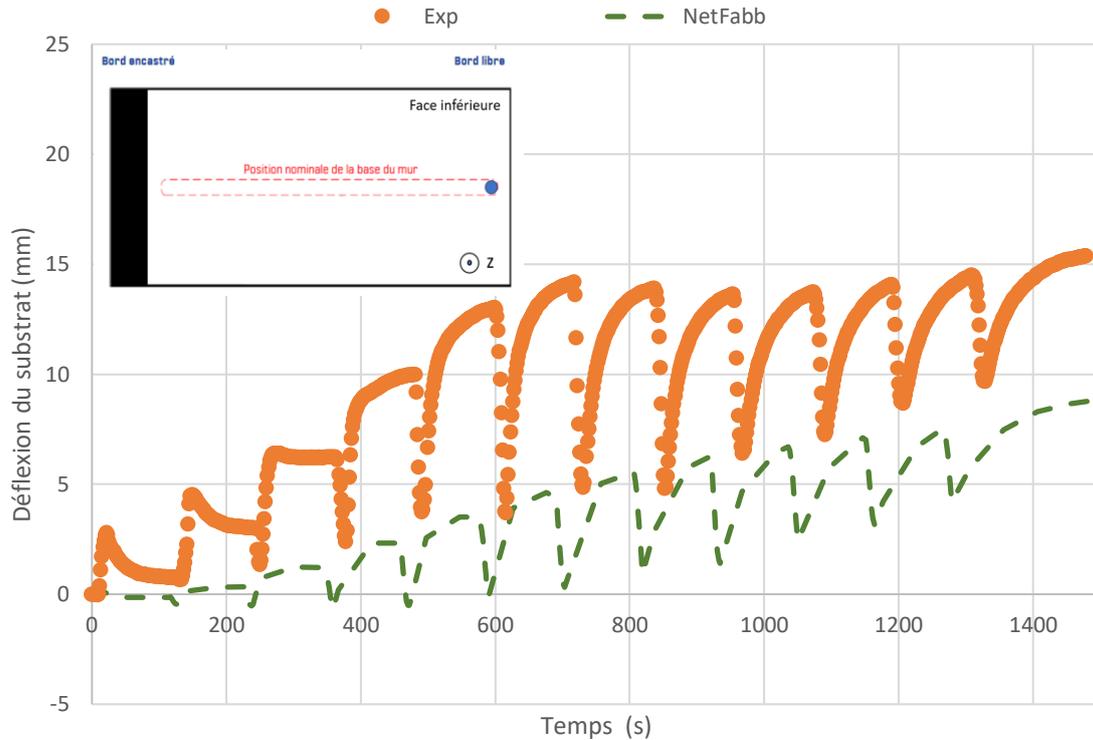


Figure 6-13 : comparaison du déplacement d'un point du substrat simulé et mesuré en cours de fabrication.

## 5. Bilan

Cette section a présenté l'évaluation de deux logiciels de simulation thermomécanique EF classique et simplifié appliqués à la simulation des procédés DED. Dans les deux cas, la simulation thermomécanique, complète ou simplifiée, ne permet actuellement qu'une prédiction qualitative des champs thermiques, principalement à cause de problématiques de paramétrisation de la source de chaleur, des données matériaux et des conditions aux limites. Des itérations sur l'ajustement des paramètres de la source de chaleur, des paramètres matériaux et des coefficients de pertes de chaleur seraient nécessaires pour améliorer la qualité des prédictions. La mise en œuvre d'un modèle thermique fiable est un prérequis pour prédire correctement les implications mécaniques en termes de déformées et de contraintes résiduelles.

Les méthodes simplifiées mises en œuvre dans le logiciel NetFabb Local Simulation contribuent à la simplification de la mise en données et la réduction significative du temps de calcul, tout en obtenant des ordres de grandeur de température similaires à une simulation transitoire complète. Ainsi, compte tenu de l'objectif de proposer des méthodes numériques compatibles avec une mise en œuvre en cours de procédé, ce logiciel a été retenu pour la poursuite de ces travaux.

## IV. Application à la prédiction des temporisations vers une interaction simulation-*monitoring*

### 1. Introduction

L'optimisation des temporisations entre couches permet de maîtriser le refroidissement de la pièce dans une certaine gamme de température afin de garantir une microstructure visée tout en limitant la génération de contraintes résiduelles. [Denlinger 2016, Cunningham 2018]. Inspiré des travaux de Montevecchi *et al.* [Montevecchi 2018], il est proposé d'utiliser la simulation thermique pour prédire les temporisations entre couches et seconder la méthode de *monitoring* thermique développée dans ces travaux [Chabot 2019]. Dans un premier temps, nous allons étudier la capacité du logiciel NLS à reproduire les températures mesurées par la caméra thermique en cours de fabrication, afin d'assurer la pertinence des données sur lesquelles se basera la méthode de prédiction des temporisations.

### 2. Présentation du cas d'étude

Cette étude considère un mur monocordon de 20 couches fabriqué par le procédé WAAM, dont les principales caractéristiques sont reportées en Tableau 6-8. Les paramètres opératoires utilisés pour la fabrication sont détaillés en Tableau 6-9. Une temporisation fixe de 30 s est appliquée entre chaque couche. Le mur final est illustré en Figure 6-14.

Tableau 6-8 : caractéristiques du mur considéré pour l'application de la simulation numérique à la prédiction des temporisations.

Matériau du substrat	S355
Epaisseur du substrat	5 mm
Largeur & longueur du substrat	150 mm
Matériau déposé	Acier inoxydable Duplex
Nombre de couches	20
Longueur du mur	100 mm

Tableau 6-9 : paramètres opératoires utilisés pour fabriquer le mur considéré pour l'application de la simulation numérique à la prédiction des temporisations.

TS	700 mm/min
WFS	7,2 mm/min
P	3460 W
Temporisation entre couches	30 s (fixe)



Figure 6-14 : mur monocordon WAAM considéré pour l'application de la simulation numérique à la prédiction des temporisations.

Au cours de la fabrication, une caméra thermique est utilisée comme illustré en Figure 6-15 afin de relever les champs thermiques au sein de la pièce. Par la suite, les températures maximales mesurées par la caméra thermique à la fin de chaque temporisation servent de données expérimentales de référence à comparer avec les résultats numériques.



Figure 6-15 : montage expérimental pour l'acquisition des données thermiques en cours de fabrication du mur considéré pour l'application de la simulation numérique à la prédiction des temporisations.

### 3. Mise en données

Cette étude reprend majoritairement le modèle numérique utilisé à la Section III.3, notamment :

- les données matériaux de l'acier inoxydable Duplex affectées à l'ensemble du modèle ;
- les dimensions des cordons – 7 mm de largeur et 1,9 mm de hauteur – ;
- la modélisation source de chaleur équivalente – voir Tableau 6-4 – ;
- le maillage hexaédral – taille d'élément de 0,5 mm dans les couches raffinées - ;
- le coefficient de convection de 25 W/m<sup>2</sup>/K.

Comme nous le verrons dans les résultats, la considération du coefficient de convection précédent conduit à une surévaluation des températures d'intérêt. Ainsi, nous avons également testé un coefficient de convection arbitrairement quatre fois supérieur pour

évaluer la tendance. Le Tableau 6-10 reprend les différents coefficients de convection testés.

Tableau 6-10 : récapitulatif des différentes modélisations testées pour modéliser le cas d'étude.

	Cas n°1	Cas n°2
Coefficient de convection	25 W/m <sup>2</sup> /K	100 W/m <sup>2</sup> /K

La méthode de *monitoring* thermique développée dans ces travaux base l'ajustement des temporisations à partir de la température maximale mesurée en surface de la pièce lors de la phase de refroidissement. Ainsi, nous allons considérer les températures maximales simulées à la fin de chaque temporisation pour confronter les résultats numériques et expérimentaux.

#### 4. Résultats et discussion

Les simulations ont été menées avec 12 processeurs. Les temps de calcul correspondants sont d'environ 10 min. Les températures d'interpasse simulées et relevées par la caméra thermique sont illustrées en Figure 6-16.

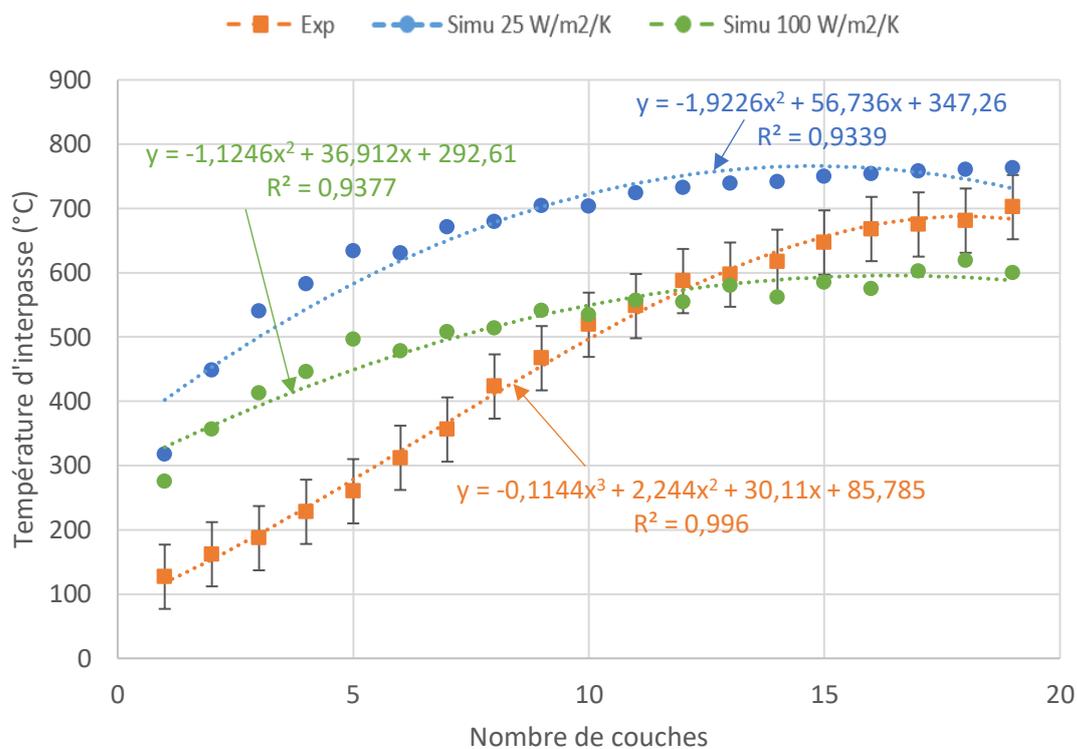


Figure 6-16 : comparaison des températures d'interpasse numériques avec les données expérimentales.

En Figure 6-16, l'évolution globale des températures expérimentales n'est pas reproduite par les modèles numériques, quel que soit le coefficient de convection testé. En effet, si l'on modélise les différentes courbes par des fonctions polynomiales, la tendance des résultats numériques peut être identifiée à une fonction polynomiale de degré 2, alors qu'une évolution polynomiale de degré 3 est attendue afin de reproduire les tendances expérimentales. Ces divergences peuvent être dues à un problème de calibration du modèle – notamment la source de chaleur équivalente – ainsi qu'à une différence entre les phénomènes physiques pris en compte dans la simulation et ceux capturés par les données expérimentales considérées.

La tendance expérimentale observée en début de fabrication peut être provoquée par des phénomènes de perte de chaleur complexes, liés à une interaction avec le substrat et non reproduits par la simulation. A l'inverse, les comportements des températures numériques et expérimentales semblent converger vers une asymptote à partir de la couche 15. Ainsi, nous observons une variation du comportement thermique de la pièce en cours de fabrication, entre les couches proches du substrat et les couches suivantes. En conséquence, face au défi que représente la simulation de ces phénomènes thermiques sur l'ensemble de la fabrication, il pourrait être envisagé de recalibrer le modèle numérique en cours de fabrication, afin de prédire les températures d'interpasse de manière quantitative localement, sur un tronçon de plusieurs couches.

## 5. Bilan

Dans l'optique de proposer une méthode de prédiction des temporisations à utiliser conjointement avec le *monitoring* thermique, l'objectif de ces travaux était de développer un modèle EF simplifié permettant de reproduire les champs thermiques mesurés expérimentalement. Cependant, les modèles proposés ne permettent pas de rendre compte quantitativement des températures mesurées expérimentalement tout au long de la fabrication, sans doute à cause d'un potentiel problème de calibration du modèle ainsi qu'à une différence entre les phénomènes physiques pris en compte dans la simulation et ceux capturés par les données expérimentales considérées.

Compte tenu de l'évolution des conditions thermiques en cours de fabrication observée expérimentalement, le modèle numérique présenté pourrait être recalibré et utilisé localement, pour les premières couches ou loin du substrat, afin de reproduire les températures mesurées de manière quantitative et prédire les temporisations à appliquer en conséquence. Cette étude pourra donner lieu à de prochaines collaborations avec les développeurs de logiciels, afin de proposer un modèle capable de simuler ce type de quantité d'intérêt, dans l'optique de faire interagir les approches de simulation et de *monitoring*.

## V. Vers l'application de la simulation à des composants de grande échelle

### 1. Introduction

Les études numériques présentées précédemment ont été menées sur des cas tests de petite échelle. Dans cette section, l'applicabilité des outils numériques considérés à des cas industriels de grandes dimensions est discutée [Moussion 2017, Queguineur 2018, Pechet 2019]. De par l'échelle de ce type de composants, l'instrumentation de la fabrication pour recueillir des données expérimentales ou mettre en œuvre des approches de *monitoring* est a priori non triviale. Ainsi, la simulation numérique apparaît comme un moyen d'optimiser la stratégie de fabrication au regard des champs thermiques et de leurs implications en termes de déformations et de contraintes résiduelles. Les prédictions de la simulation peuvent également permettre d'aiguiller le positionnement des capteurs dans l'environnement de manière à surveiller des zones identifiées comme critiques.

### 2. Présentation du cas d'étude

Ces travaux d'application des outils numériques à disposition sur des pièces grandes échelles ont porté sur une pale d'hélice navale en acier inoxydable, fabriquée dans le cadre du projet RAMSSES [Péchet 2019]. Cette pale d'hélice, illustrée en Figure 6-17, est de 1000 mm de hauteur et 750 mm de longueur, comporte plus de 500 couches, et a été fabriquée au laboratoire en environ 100h.



Figure 6-17 : vues de face et de côté d'une pale d'hélice navale fabriquée à Centrale Nantes.

### 3. Mise en données

Pour les logiciels EF généralistes actuels, la mise en données des couches est majoritairement manuelle, ce qui rend la modélisation de pièces à fort nombre de couches inaccessible avec ce type d'outil. Parmi les logiciels testés, NLS propose des fonctions de mise en données adaptées à la modélisation de pièces complexes de grandes dimensions, notamment la génération automatique de la géométrie des cordons à partir des trajectoires directement générées par Powermill.

Dans ces travaux, une simulation thermique de la première section de la pale – 15 couches – est menée avec NLS afin de démontrer la faisabilité de simulation de ce type de composant. La section de la pale simulée est illustrée en Figure 6-18. Le modèle numérique mis en œuvre dans cette étude est détaillé en Tableau 6-11. Ce modèle reprend les principales caractéristiques de celui proposé en Section III.3 – voir Tableau 6-11. Le modèle est maillé avec une taille d'élément dans la zone raffinée d'environ 2 mm et 50 mm dans la zone déraffinée. Le pas de temps de calcul est fixé à 0,2 s.

Tableau 6-11 : modèle numérique utilisé pour simuler le cas d'étude grande échelle.

<b>Matériau</b>	Acier inoxydable Duplex
<b>Source de chaleur</b>	Double Ellipsoïde paramétrisée en Tableau 6-4
<b>Vitesse d'avance</b>	12 mm/s
<b>Coefficient de convection</b>	25 W/m <sup>2</sup> /C
<b>Nombre de couches</b>	15
<b>Temporisation entre couches</b>	0 s

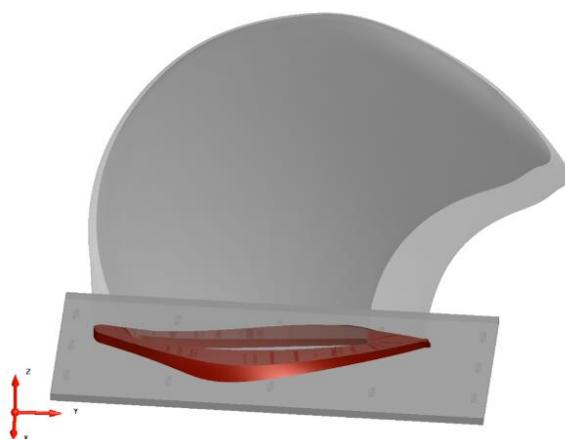


Figure 6-18 : modèle CAO de la pale d'hélice navale considérée dans ce cas d'étude. La section simulée dans ces travaux est illustrée en rouge

## 4. Résultats

Pour simuler le dépôt des 15 premières couches de la pale, le temps de calcul avec les moyens à disposition (6 cœurs) a été de 17 j, soit d'un peu plus de 24 h par couche. Nous avons constaté que le temps de calcul par couche est faiblement influencé par le nombre de couches déposés. Ainsi, dans l'optique de simuler la totalité de la pale, la stratégie de raffinement automatique et les méthodes de résolution simplifiées du logiciel permettront sans doute de maintenir un temps de calcul par couche identique malgré l'augmentation du nombre de couches dans le modèle.

Un exemple de champs thermiques simulés en cours de fabrication est illustré en Figure 6-19. L'exemple considéré concerne la 9<sup>e</sup> couche de la section simulée de la pale. Lorsqu'un modèle thermique fiable aura été développé et validé sur des cas de petite échelle, il sera possible d'étudier la pertinence des résultats thermiques simulés pour ce type de composant et de conclure sur les perspectives d'amélioration de la stratégie de fabrication offertes par la simulation.

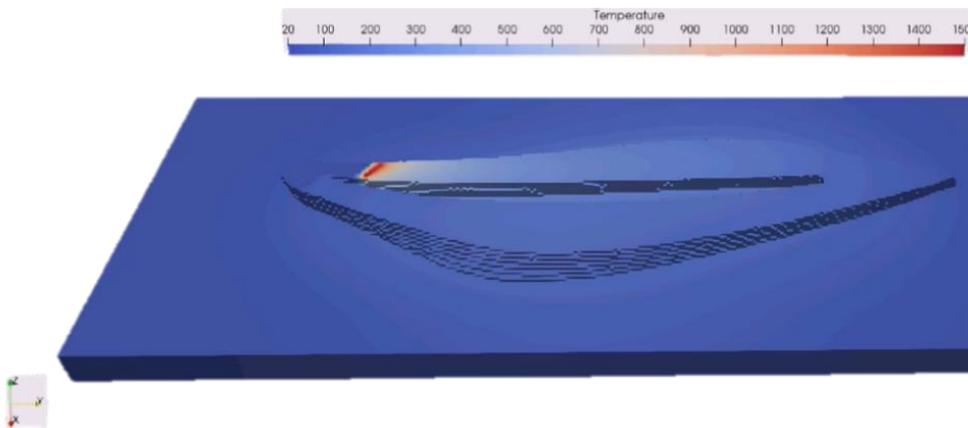


Figure 6-19 : champs thermiques en cours de dépôt de la 9<sup>e</sup> couche de la pale.

## 5. Etude des perspectives offertes par le calcul intensif

Pour les composants de grande échelle fabriqués en WAAM, le recours au calcul intensif peut être une approche pertinente pour réduire les temps de calcul et les rendre compatibles avec les exigences industrielles. Ainsi, les simulations sur ce type de moyens numériques permettraient la planification et l'optimisation des stratégies de fabrication a priori, au regard des évolutions thermiques et des contraintes résiduelles simulées. Dans une démarche exploratoire, cette étude investigate les gains de temps de calcul offerts par le supercalculateur Liger de Centrale Nantes pour la simulation de la pale précédemment considérée.

Dans un premier temps, la simulation thermique de la première section de la pale – voir Figure 6-18 – est menée sur le supercalculateur Liger afin d'évaluer les gains de temps de calcul par rapport aux équipements numériques internes au laboratoire, utilisés dans la section précédente. Avec la version 2019 de NetFabb Local Simulation à disposition, les simulations sur le supercalculateur peuvent être conduites sur un nœud de calcul, comportant au maximum 24 cœurs. Avec 24 cœurs, le temps de calcul total pour simuler le dépôt des 15 premières couches de la pale a été d'environ 2 jours, soit une réduction de temps de calcul d'environ 83 % par rapport aux calculs précédemment menés sur 6 cœurs au laboratoire (17j). Etant donné que les machines sont différentes, cette comparaison du temps de calcul n'est qu'indicative. Ainsi, dans un second temps, nous étudierons de façon systématique l'évolution du temps de calcul en fonction du nombre de cœurs sur un seul nœud de calcul de Liger. L'objectif est de pouvoir prédire le temps de calcul en fonction du nombre de cœurs afin d'allouer les ressources optimales – temps de calcul et nombre de cœurs – sur ce supercalculateur.

Cette étude considère des simulations de la première couche de la pale, réalisée avec 2 à 24 cœurs. Dans l'optique de prédire l'évolution du temps de calcul en fonction du nombre de cœurs, une première approche relevée dans la littérature consiste à faire l'hypothèse que le temps de calcul total peut se définir comme la somme de deux fractions de temps parallélisable et séquentielle [Patterson 1990] :

$$t_{tot}(n) = \left(S + \frac{P}{n}\right) t_1 \quad \text{Equation 6-2}$$

Avec :  $t_{tot}$  temps de calcul total,

n nombre de cœurs,

S fraction du temps de calcul  $t_1$  séquentielle et non parallélisable,

P fraction du temps de calcul  $t_1$  parallélisable,

S+P=1,

$t_1$  temps de calcul avec un cœur, autrement noté  $t_{tot}(1)$ .

A partir de l'Equation 6-2, nous pouvons identifier une relation linéaire entre le temps de calcul total et l'inverse du nombre de processeurs :

$$t_{tot}(n) = A + Bn^{-1} \quad \text{Equation 6-3}$$

Avec  $A = St_1$ ,

$B = Pt_1$ .

Les temps de calcul sont représentés en fonction de l'inverse du nombre de cœurs en Figure 6-20. Nous observons une rupture d'alignement des points proche de l'origine, c'est-à-dire pour des nombres de cœurs élevés. En conséquence, l'identification des coefficients A et B du modèle est menée avec une régression linéaire pour les temps de calcul obtenus entre 2 et 12 cœurs. Pour ce cas d'application, nous identifions le modèle linéaire suivant :

$$t_{tot}(n) = 1,47 + 62,4 * n^{-1} \quad \text{Equation 6-4}$$

Ainsi, à partir de l'Equation 6-4, nous pouvons estimer une fraction de temps de calcul non parallélisable de 1,5 %, comme détaillé ci-dessous :

$$S = \frac{\frac{A}{B}}{1 + \frac{A}{B}} \approx \frac{1}{64} \approx 1,5\%$$

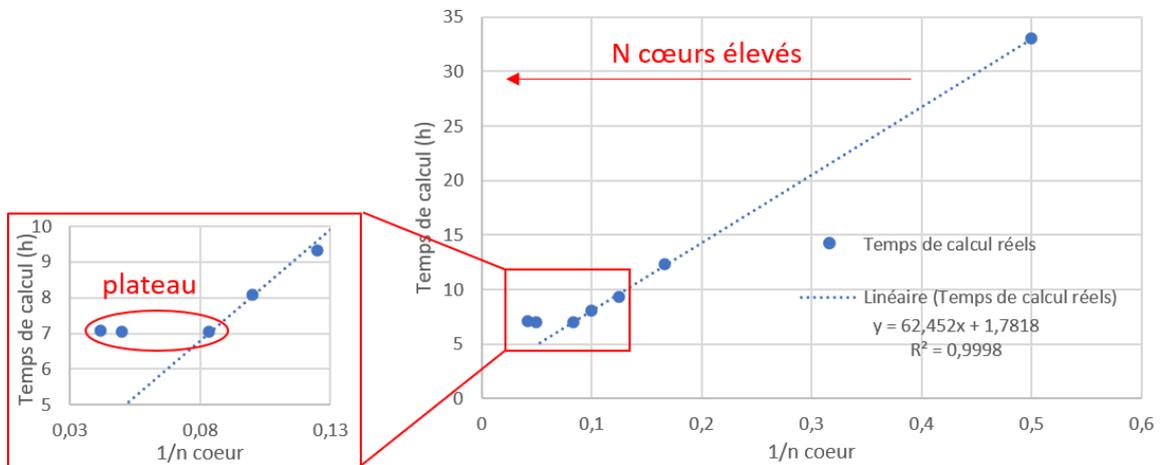


Figure 6-20: identification des coefficients du modèle de prédiction du temps de calcul en fonction du nombre de cœurs, pour la simulation de la 1<sup>re</sup> couche de la pale.

La comparaison des temps de calculs réels avec le modèle proposé en Equation 6-4 est illustrée en Figure 6-21.

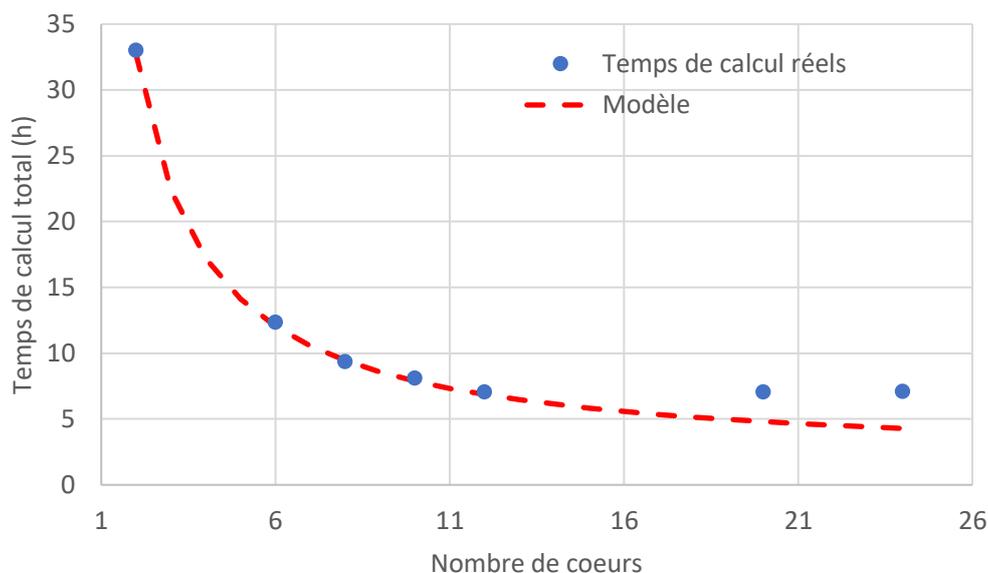


Figure 6-21 : comparaison des temps de calcul réels avec le modèle pour la simulation de la 1<sup>e</sup> couche de la pale.

En Figure 6-21, les temps de calcul réels cessent de décroître à partir de 12 cœurs et ré-augmentent légèrement entre 20 et 24 cœurs, ce qui est a priori contre-intuitif. Dans la littérature, nous pouvons citer les goulots d'étranglement pour l'accès à la mémoire partagée du nœud de calcul et l'augmentation du coût de communications inter-cœurs avec le nombre de cœurs comme causes du comportement des temps de calcul observé [Patterson 1990]. Ainsi, entre 20 et 24 cœurs, le surcoût de parallélisation l'emporte sur le gain de temps lié distribution du calcul aux différents cœurs. Par ailleurs, le modèle est en accord avec les temps de calcul réels inférieurs à 12 cœurs, mais sous-estime les temps de calcul pour des nombres de cœurs élevés. Le modèle faisant l'hypothèse d'une parallélisation parfaite de la fraction de temps de calcul  $P$ , non vérifiée en pratique du fait des causes précédemment citées, il sort de son domaine de validité pour les hauts nombres de cœurs.

Cette étude nous permet de conclure que pour un problème de taille donnée, il existe un nombre de cœurs optimal à partir duquel la parallélisation perd en efficacité. Pour notre cas d'intérêt, cet optimum peut être identifié à 12 cœurs. Il convient de mentionner que cette limite d'efficacité parallèle dépend de la taille du modèle numérique : pour un modèle avec plus d'éléments, il est probable que cette limite soit repoussée. Inversement, la limite d'efficacité est atteinte à un plus faible nombre de cœurs pour de plus petits modèles comportant peu d'éléments, tel que le mur de 10 couches étudié à la Section IV.

## 6. Bilan

Dans cette section, l'applicabilité d'un logiciel de simulation thermomécanique EF simplifié à la simulation de pièces WAAM grande échelle a été investiguée. La communication des logiciels de simulation du procédé avec les autres entités de la chaîne numérique est un atout majeur pour simplifier la mise en données de ce type de composant. Par ailleurs, le recours à des méthodes EF simplifiées permet de diminuer le temps de calcul et d'ouvrir les capacités de simulation de ces logiciels aux pièces de grande échelle. Pour ce type de composant, l'utilisation de moyens de calcul intensif permet de rapprocher les temps de calcul des exigences industrielles et d'ouvrir la voie vers de l'optimisation de la stratégie de fabrication a priori pour ce type de composants.

## VI. Conclusion

Ces travaux ont permis de dresser un premier aperçu du potentiel offert par certains outils de simulation actuels pour améliorer les performances des procédés DED. Le domaine de la simulation numérique des procédés DED est actuellement en plein essor. Au travers les études numériques menées, nous avons pu identifier une évolution des fonctions de mise en données et des méthodes numériques permettant d'améliorer les performances des simulations et d'étendre leur champ d'application à des pièces complexes et de grande échelle. Ainsi, ces travaux illustrent l'intérêt de mettre en œuvre des méthodes simplifiées telles que celle utilisée dans NetFabb Local Simulation [Li 2019], ou des approches de réduction de modèles [Agouzoul 2019, Quaranta 2020] pour simuler ce type de procédés.

Actuellement, les modèles EF ne permettent qu'une prédiction qualitative des champs thermiques, principalement à cause d'incertitudes sur les phénomènes à simuler et de difficultés à paramétrer la source de chaleur équivalente ainsi que les conditions aux limites. De par le manque de précision des prédictions thermiques, l'application de la simulation EF à la prédiction des champs de contraintes résiduelles et des déformations associées est limitée. Cependant, ces modèles thermiques rapides et qualitatifs pour les procédés DED, rendus possibles par l'utilisation de méthodes simplifiées efficaces, sont de premiers éléments prometteurs ouvrant la voie vers l'élaboration d'un dialogue entre la simulation EF et le *monitoring*. En ce sens, il conviendra de renforcer les collaborations avec les éditeurs de logiciels afin de rassembler les deux domaines d'expertise numérique et sur ce type de procédés. Notamment, il apparaît pertinent de poursuivre l'application de la simulation numérique sur des cas concrets tels que considérés dans ces travaux, pour faire converger les deux approches vers des méthodes de contrôle du procédé fiables et robustes.



## Chapitre 7 : Conclusions et perspectives

### I. Synthèses des travaux menés

La **Fabrication Additive métallique** apporte de **nouvelles possibilités de fabrication** et de **liberté de conception** des pièces fonctionnelles métalliques. Notamment, la **capabilité** et le **potentiel** des **procédés DED** à réaliser des pièces industrielles ont été démontrés sur des cas précis. Actuellement, pour un nouveau cas d'application, l'obtention d'une pièce conforme aux exigences du cahier des charges résulte le plus souvent d'une **méthode essai-erreur**. Afin d'améliorer la maîtrise des procédés DED et de s'affranchir de cette méthode essai-erreur, la **simulation numérique** et le **monitoring** sont les principales pistes investiguées dans la littérature. Dans le cadre de ces travaux, la piste du **monitoring** a été privilégiée. Face à la **complexité des phénomènes** mis en jeu lors de la fabrication DED, cette thèse propose une **methodologie générique de monitoring multiphysique**, basée sur quatre **boucles de contrôle indépendantes** et **pouvant être mises en œuvre simultanément**. Ces boucles de contrôle se focalisent sur la **température**, la **géométrie** et la **santé matière de la pièce** ainsi que sur le **Stick Out** en cours de fabrication. Dans ces travaux, les boucles de contrôle ont été **principalement développées et mises en œuvre avec le procédé WAAM**. Un soin particulier a été porté sur la prise de mesure et le choix des grandeurs physiques et des paramètres opératoires à considérer pour rendre les boucles de contrôle **adaptables au procédé LMD**. Parallèlement à ces développements, certains **outils numériques** existants ont également été évalués dans l'optique d'être intégrés dans l'environnement de fabrication aux côtés du **monitoring**.

#### 1. Synthèse par chapitre

Le **Chapitre 1** présente tout d'abord le domaine de la **Fabrication Additive métallique**, en mettant en avant les **problématiques de mise en œuvre** actuellement rencontrées pour une famille particulière de procédés, les **procédés DED**. Face à ce constat, les approches de **monitoring** et de **simulation numérique** dédiées à ces procédés sont présentées dans un **état de l'art général**. Ce chapitre présente également la **vision globale de recherche** du laboratoire dans laquelle s'inscrivent ces travaux de thèse. Comme rappelé en Figure 7-1, il est souhaité mettre en œuvre **conjointement les outils de monitoring et numérique** pour améliorer la fiabilité de ces procédés.

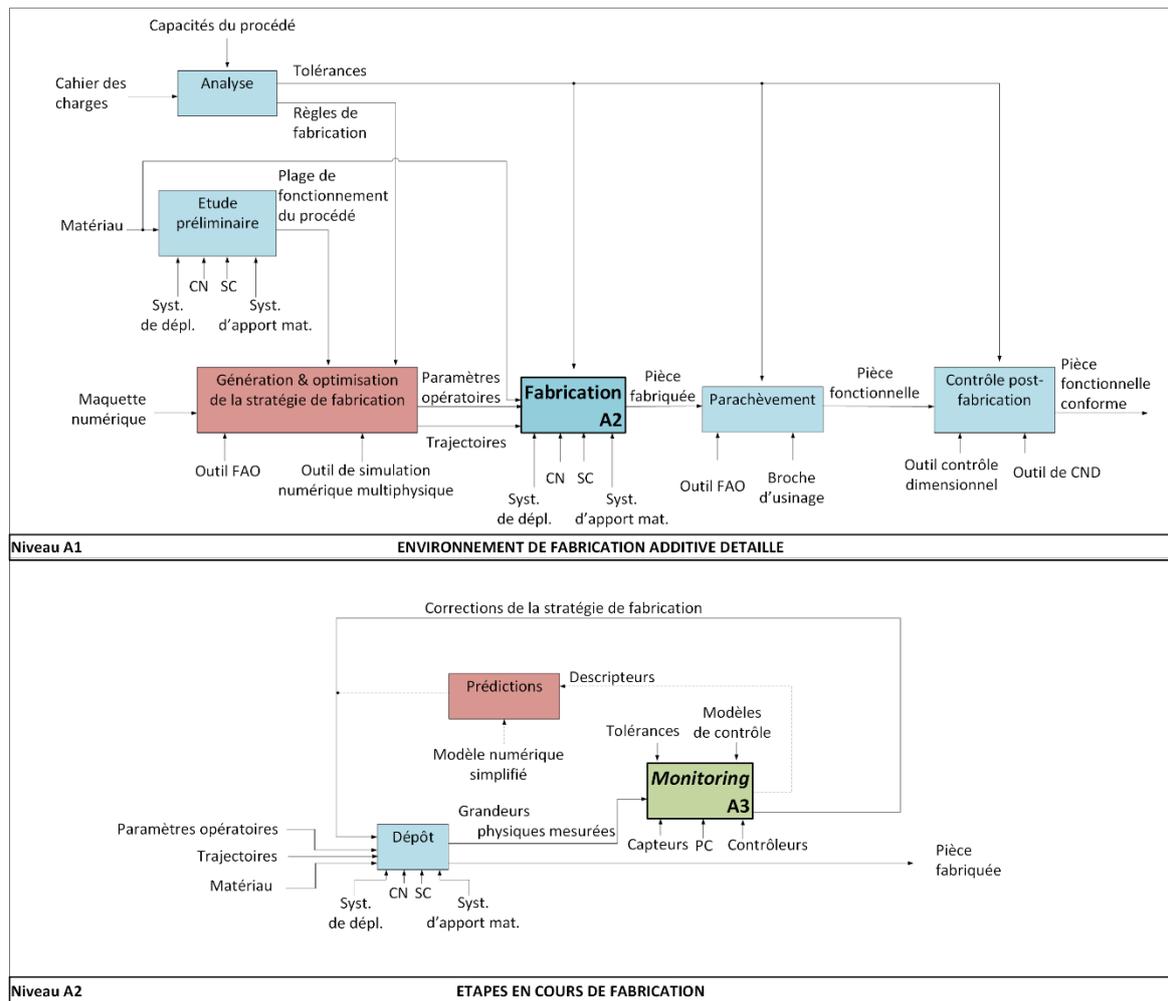


Figure 7-1 : intégration des outils de maîtrise dans un environnement de fabrication additive.

Les **phénomènes thermiques** jouant un rôle crucial en cours de fabrication, ils ont été abordés en premier dans le **Chapitre 2**. La stratégie de contrôle thermique retenue se focalise sur les champs thermiques à la surface de la pièce afin de limiter l'**accumulation de chaleur**. La boucle de contrôle développée commande le dépôt de la couche suivante lorsque la pièce refroidit à une **température d'interpasse** préconisée en fonction de la microstructure finale souhaitée. A travers un cas d'application à un composant monocordon, nous avons montré que l'implémentation de ce type de *monitoring* thermique permettait d'**améliorer la microstructure et la stabilité géométrique** des couches déposées par rapport à une fabrication en boucle ouverte.

Le **Chapitre 3** a porté sur l'élaboration d'une **boucle de contrôle géométrique** à mettre en œuvre **simultanément** avec la précédente **boucle de contrôle thermique** afin d'appréhender l'impact des phénomènes thermiques sur la géométrie de la pièce et de garantir une **géométrie finale souhaitée**. Le principal défi rencontré pour le développement d'une boucle de contrôle géométrique réside dans l'**estimation fiable** de la hauteur de couche réelle à partir d'une mesure *in-situ*, du fait de la refusion du haut

de la couche avec le dépôt des suivantes. Dans ces travaux, nous avons proposé de considérer **la hauteur de couche moyenne** déposée sur un tronçon de plusieurs couches. Etant donné que la température de la pièce est maîtrisée en cours de fabrication avec la méthodologie de *monitoring* proposée, cette grandeur mesurée est **au plus proche de la hauteur de couche réelle**. En sortie de la boucle de contrôle, **la vitesse d'avance** a été sélectionnée pour ajuster la quantité de matière déposée, de manière à garantir le dépôt de la hauteur de couche de référence et atteindre la hauteur finale souhaitée. La **stratégie de *monitoring* thermo-géométrique**, résultant de la **mise en parallèle des deux boucles de contrôle** du Chapitre 2 et 3, a fait l'objet d'une publication scientifique dans le journal *Welding in the World* [Chabot 2019]. Dans le cadre d'une application à la fabrication d'un composant monocordon, les résultats montrent que l'implémentation d'un contrôle thermo-géométrique permet de **respecter les dimensions fixées par le cahier des charges, contrairement à des fabrications menées en boucle ouverte et avec contrôle thermique seul**.

La géométrie des cordons étant également dépendante des paramètres opératoires, notamment le *Stick Out*, nous avons souhaité proposer une méthode pour contrôler ce paramètre en cours de fabrication. En ce sens, le développement d'une troisième boucle de contrôle a fait l'objet du **Chapitre 4**. Inspirée de méthodes de contrôle mises en œuvre en soudage, nous avons développé une **méthode de mesure originale du SO par des moyens sonores**. Dans le cas du procédé WAAM-CMT, **une fréquence contenue dans le spectre sonore corrélée avec le SO** a été identifiée. Cette fréquence permet d'effectuer une **mesure indirecte du SO simple, fiable**, avec des **capteurs peu coûteux et non embarqués**. A partir de la méthode de mesure développée, nous avons proposé une **stratégie de *monitoring* du SO simple à mettre en œuvre**.

Le **Chapitre 5** propose une **méthode de mesure CND par ultrasons** dans l'optique de **contrôler la santé matière** en cours de fabrication. Ces travaux ont fait l'objet d'une deuxième publication scientifique dans le *Journal of Intelligent Manufacturing* [Chabot 2019]. **L'encombrement réduit** du capteur, ainsi que les **temps de mesure et de post-traitement** rendent la **méthode de mesure développée compatible** avec une **mise en œuvre en cours de fabrication**. De plus, les essais menés dans le cas du WAAM montrent que dans certains cas, la méthode de mesure développée peut être **mise en œuvre sur un état de surface brut de fabrication**, ce qui ouvrirait la voie vers **un contrôle de la santé matière entre les phases de dépôt**.

Finalement, le **Chapitre 6** présente les investigations de **l'axe numérique** dans l'optique de l'intégrer dans l'environnement de fabrication **aux côtés de la méthodologie de *monitoring* développée**. Ces travaux ont fait l'objet d'une présentation à la Conférence MUGV & Manufacturing'21 [Chabot 2019]. Les études menées montrent qu'il reste encore beaucoup d'étapes à franchir pour pouvoir produire des **prédictions quantitatives**

pertinentes du point de vue du *monitoring*. Cependant, le développement de **modèles numériques rapides et qualitatifs**, rendu possible par l'utilisation de **méthodes simplifiées**, est un premier pas prometteur vers des stratégies de contrôle mêlant *monitoring* et simulation. Il conviendra de **poursuivre les collaborations avec les éditeurs de logiciels** pour faire converger les deux approches.

Les boucles de contrôle développées dans ces travaux sont **complémentaires, indépendantes** et peuvent être **mises en œuvre simultanément** pour former une **stratégie de *monitoring* multiphysique**. En effet, la définition des boucles de contrôle, en termes de prise de mesure, de grandeurs physiques considérées et de paramètres opératoires corrigés, **limite leurs interactions** et permet une **mise en parallèle** en cours de fabrication. L'**instrumentation** de l'environnement de fabrication complète est illustrée en Figure 7-2. La Figure 7-3 décrit le **scénario de *monitoring*** résultant de la mise en parallèle des boucles de contrôle présentées. Dans ce scénario, la boucle de ***monitoring* thermique global** garantit que le **temps d'attente** entre chaque couche permet à la pièce de refroidir dans **une plage de température souhaitée**. Parallèlement, le ***Stick Out* réel** est estimé à partir des **mesures sonores** menées en cours de dépôt. La **position de l'effecteur** peut être réajustée à la couche suivante de façon à **maintenir un SO proche de la valeur préconisée**. Toutes les cinq couches, la **géométrie de la pièce** est **scannée après dépôt** afin d'estimer la **hauteur de couche réelle** déposée au tronçon considéré, et la valeur de la **vitesse d'avance** est réactualisée en fonction de **l'écart avec la hauteur de couche de référence** fixée en amont de la fabrication.

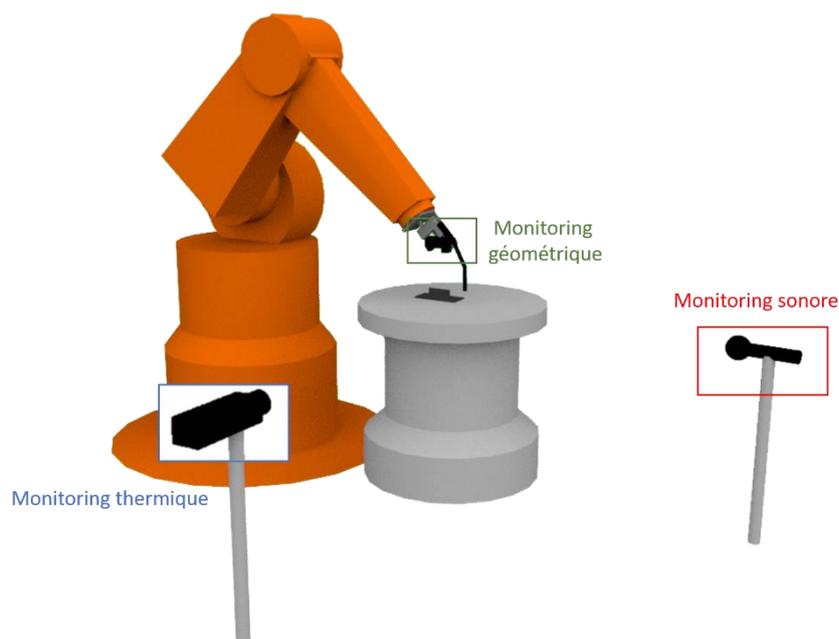


Figure 7-2 : instrumentation d'un environnement de Fabrication Additive DED pour mettre en œuvre simultanément les différentes boucles de contrôle développées dans ces travaux.

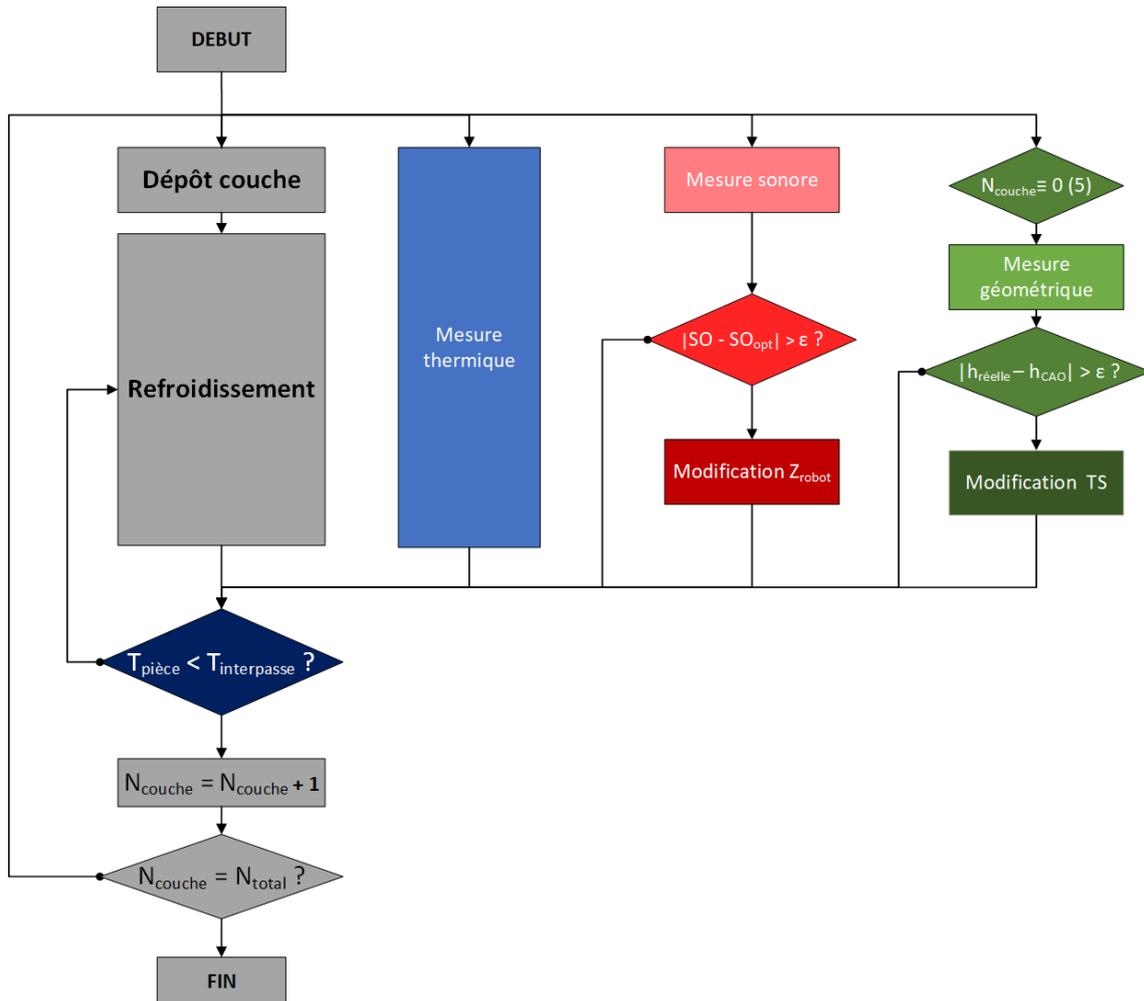


Figure 7-3 : algorithme complet de la stratégie de monitoring multiphysique développée dans ces travaux.

## 2. Synthèse globale

A partir d'une **vision interdépendante des phénomènes fondamentaux** ayant lieu pendant les **procédés DED**, ces travaux de thèse ont montré qu'une **approche découplée de *monitoring* multiphysique** permettait de **maîtriser la fabrication**. La démarche de développement de la stratégie de *monitoring* multiphysique nous permet de proposer une **hiérarchisation** des éléments représentatifs du procédé **WAAM** dans le cas de **pièces monocordons**, illustrée en Figure 7-4.

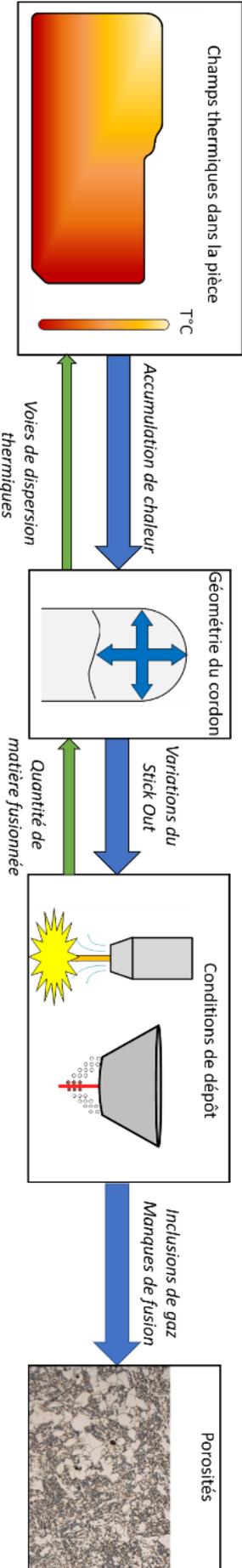


Figure 7-4 : proposition de hiérarchisation des éléments constitutifs du procédé WAAM.

En Figure 7-4, d'une part, les sollicitations thermiques globales induisent des variations significatives de la géométrie des cordons. A l'inverse, l'approche de *monitoring* thermo-géométrique proposée a permis de montrer que l'impact de la géométrie des cordons sur les phénomènes thermiques est limité dans les configurations monocordons. Ainsi, l'interaction entre les deux phénomènes pourrait se traiter en couplage faible. En garantissant la maîtrise des phénomènes thermiques et de leurs implications en termes de géométrie, de faibles ajustements du *Stick Out* suffisent à maintenir le procédé dans la plage de fonctionnement souhaitée tout au long de la fabrication. Finalement, la santé matière de la pièce résulte de la maîtrise des trois éléments précédemment cités.

## II. Contributions

La principale contribution de ces travaux est la proposition d'une méthodologie de *monitoring* multiphysique dédiée aux procédés DED, basée sur plusieurs boucles de contrôle indépendantes pouvant être mises en œuvre simultanément. A notre connaissance, il s'agit de l'une des premières contributions de cet ordre dans le domaine du *monitoring* des procédés DED. Pour chaque axe de contrôle identifié dans la méthodologie, ces travaux ont proposé des stratégies de *monitoring* basées sur des méthodes de mesure fiables et simples. La mise en œuvre simultanée de boucles de contrôle thermique et géométrique constitue une des premières applications de stratégie de *monitoring* multiphysique aux procédés DED. Ensuite, la stratégie de *monitoring* du *Stick Out* par des moyens sonores se démarque des autres approches de contrôle de par ses considérations fréquentielles. Les travaux relatifs à l'inspection des pièces DED par des moyens ultrasonores ont permis de lever un verrou de prise de mesure et ouvrent la voie vers des perspectives prometteuses de *monitoring* de la santé matière.

La stratégie de *monitoring* développée peut être implémentée sur la fabrication de composants grande échelle monocordon et comportant des parois rectilignes, moyennant une amélioration de la prise de mesure thermique pour garantir la compatibilité entre le champ de vision de la caméra thermique avec la taille de la pièce. Par ailleurs, la stratégie peut être étendue à d'autres matériaux dont le dépôt ne génère pas de fumées, moyennant une mise au point des méthodes de mesure en termes de calibration des capteurs et des abaques de contrôle. Le transfert à d'autres procédés DED est également envisageable pour la stratégie de *monitoring* globale, moyennant l'adaptation et la mise au point de la prise de mesure pour l'environnement de fabrication considéré.

Enfin, les travaux numériques proposent un **retour d'expérience** sur certains outils en tant qu'**utilisateur final** souhaitant les intégrer conjointement au *monitoring* dans l'environnement de fabrication.

### III. Perspectives

À la lumière de ces travaux, plusieurs perspectives peuvent être envisagées, relatives aux **boucles de contrôle** développées dans chaque chapitre, à la **stratégie de *monitoring* multiphysique globale** résultante, ainsi qu'aux **moyens de maîtrise des procédés DED**.

#### 1. Perspectives pour le *monitoring*

Plusieurs perspectives sont envisagées pour poursuivre les travaux de ***monitoring thermique*** présentés dans le **Chapitre 2**. Les données de la caméra thermique pourraient également être utilisées pour calculer les **vitesse de refroidissement** dans l'optique d'apporter des pistes de **prédiction de la microstructure** à partir de cartographies du procédé [Kobryn 2003]. L'ajout d'un **contrôle thermique du bain de fusion** permettrait d'apporter des pistes supplémentaires de **contrôle et de prédiction** de la microstructure, notamment en termes de **proportion de phase** et de **morphologie des grains** [Farshidianfar 2016 & 2017].

Concernant l'axe de ***monitoring géométrique*** développé au **Chapitre 3**, des **corrections couplées de la vitesse d'avance et de l'apport de matière** pourraient être développées pour **améliorer la maîtrise des dimensions du cordon**. En ce sens, il pourrait être pertinent de prendre en compte de la **largeur du cordon**, conjointement à la hauteur de couche, en entrée de la boucle de contrôle [Han 2018].

Dans la continuité des travaux du **Chapitre 4**, il convient de **poursuivre les investigations du potentiel de *monitoring* sonore** dans le cas du procédé WAAM. La **caractérisation de la signature acoustique du procédé LMD** permettrait de déterminer l'applicabilité de la méthode de contrôle sonore proposée. A partir de la mesure du *Stick Out*, une **correction en temps réel des trajectoires** à partir de méthodes inverses pourrait être développée [Hascoët 1989].

En perspective du **Chapitre 5**, l'investigation de **l'impact de la température sur la mesure** apparait comme l'une des prochaines étapes de travail à aborder pour déterminer la faisabilité d'une **inspection CND en cours de dépôt**.

## 2. Perspectives pour l'amélioration des performances des procédés DED

Pour finir, nous pouvons évoquer les pistes suivantes pour compléter la méthodologie de *monitoring* développée dans ces travaux :

- l'élaboration un **dialogue simulation-*monitoring*** dans l'optique de limiter le nombre d'essais de mise au point et de garantir la conformité de la pièce dès la première fabrication [Poulhaon 2014] ;
- le recours à l'**apprentissage automatique (*machine learning*)**, à partir de bases de données expérimentales ou obtenues par la simulation, permettra améliorer les performances et la rapidité des stratégies de *monitoring* proposées [Li 2019].

## Références bibliographiques

Agouzoul, A., Poulhaon, F., & Joyot, P. (2019, May). Analyse inverse des déformations inhérentes à l'aide d'un modèle réduit paramétrique. Application au procédé SLM.

Almeida, P. S., & Williams, S. (2010). Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). In *Proceedings of the twenty-first annual international solid freeform fabrication symposium*, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.

Alvarez, T. R., Pavarino, M. R. C., Souza, G. C. D., Pardal, J. M., Tavares, S. S. M., Ferreira, M. L. R., & Cardote Filho, I. (2014). Influence of interpass temperature on the properties of duplex stainless steel during welding by submerged arc welding process, *Welding International*, 30:5, 348-358, DOI: 10.1080/09507116.2015.1096500.

Arata, Y., Inoue, K., Futamata, M., & Toh, T. (1981). Investigation on Welding Arc Sound (Report 4): Vibration Analysis of Base Metal during Welding. *Transactions of JWRI*, 10(1), 39-45.

Aucott, L., Dong, H., Mirihanage, W., Atwood, R., Kidess, A., Gao, S., ... & Connolley, T. (2018). Revealing internal flow behaviour in arc welding and additive manufacturing of metals. *Nature communications*, 9(1), 1-7.

Bandyopadhyay, A., & Traxel, K. D. (2018). Invited review article: metal-additive manufacturing—modeling strategies for application-optimized designs. *Additive manufacturing*, 22, 758-774.

Biegler, M., Graf, B., & Rethmeier, M. (2018). In-situ distortions in LMD additive manufacturing walls can be measured with digital image correlation and predicted using numerical simulations. *Additive Manufacturing*, 20, 101-110.

Blitz, J., Simpson, G., (1996). *Ultrasonic methods of non-destructive testing*. 1st ed. London: Champman & Hall.

Boone, N., Zhu, C., Smith, C., Todd, I., & Willmott, J. R. (2018). Thermal near infrared monitoring system for electron beam melting with emissivity tracking. *Additive Manufacturing*, 22, 601-605.

Bourell, D. L., Beaman, J. J., Leu, M. C., & Rosen, D. W. (2009). A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead, *US-Turkey Workshop on Rapid Technologies*.

Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Berckmans, W., & Le Masson, P. (2020). Heat transfer, fluid flow and electromagnetic model of droplets generation and melt pool behaviour for wire arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 148, 119102.

Cai, M., Wu, C., & Gao, X. (2018, July). The influence of arc length correction on welding in cmt welding. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 170, No. 4, p. 042106). IOP Publishing.

Chabot, A., Rauch, M., Hascoët, J.-Y. (2019). Towards a multi-sensor monitoring methodology for AM metallic processes. *Journal Welding in the World*, DOI: 10.1007/s40194-019-00705-4.

Chabot, A., Laroche, N., Carcreff, E., Rauch, M., Hascoët, J.-Y. (2019). Towards defect monitoring for metallic additive manufacturing components using phased array ultrasonic testing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01505-9>.

Chabot, A., Hascoët, J. Y., & Rauch, M. (2019, July). Interest of process monitoring and numerical simulation to improve metallic additive manufacturing processes. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2113, No. 1, p. 150002). AIP Publishing LLC.

Chauveau, D. (2018). Review of NDT and process monitoring techniques usable to produce high-quality parts by welding or additive manufacturing. *Journal Welding in the World*, <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0609-3>.

Cerniglia, D., & Montinaro, N. (2018). Defect Detection in Additively Manufactured Components: Laser Ultrasound and Laser Thermography Comparison. *Procedia Structural Integrity*, 8, 154-162.

Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672-686.

De Cheveigné, A., & Kawahara, H. (2002). YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4), 1917-1930.

Denlinger, E. R., Heigel, J. C., Michaleris, P., & Palmer, T. A. (2015). Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 123-131.

Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1-4), 465-481.

Ding, D., Pan, Z. S., Cuiuri, D., & Li, H. (2014). A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1-4), 173-183.

- Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Sequeira Almeida, P. M., Wang, F., & Williams, S. (2011). Thermo-mechanical analysis of WAAM process on large multi-layer parts, *Computational Materials Science*, 50, 3315-3322.
- Donadello, S., Motta, M., Demir, A. G., & Previtali, B. (2019). Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation. *Optics and Lasers in Engineering*, 112, 136-144.
- Emamian, A., Farshidianfar, M. H., & Khajepour, A. (2017). Thermal monitoring of microstructure and carbide morphology in direct metal deposition of Fe-Ti-C metal matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 710, 20-28.
- Everton, S. K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R. K., & Clare, A. T. (2016). Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 95, 431-445.
- Farshidianfar, M. H., Khajepour, A., & Gerlich, A. P. (2016). Effect of real-time cooling rate on microstructure in Laser Additive Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 231, 468-478.
- Farshidianfar, M. H., Khajepour, A., & Gerlich, A. (2016). Real-time control of microstructure in laser additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(5-8), 1173-1186.
- Farshidianfar, M. H., Khajepouhor, A., & Gerlich, A. (2017). Real-time monitoring and prediction of martensite formation and hardening depth during laser heat treatment. *Surface and Coatings Technology*, 315, 326-334.
- Fathi, A., Khajepour, A., Toyserkani, E., & Durali, M. (2007). Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward PID controller. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35(3-4), 280-292.
- Felice, M. V., Fan, Z., (2018). Sizing of flaws using ultrasonic bulk wave testing: A review, *Ultrasonics*, 88, 26-42.
- François, M. (2009). Introduction aux ondes élastiques, <http://www.fast.u-psud.fr/>.
- Francois, M. M., Sun, A., King, W. E., Henson, N. J., Tournet, D., Bronkhorst, C. A., ... & Gibbs, J. W. (2017). Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(LA-UR-16-24513. SAND-2017-6832J).
- Gaja, H., & Liou, F. (2017). Defects monitoring of laser metal deposition using acoustic emission sensor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4), 561-574.

- Garmendia, I., Leunda, J., Pujana, J., & Lamikiz, A. (2018). In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning. *Procedia Cirp*, 68, 375-380.
- Gasquet, G., & Witomski, P. (1996). *Analyse de Fourier et applications*, Dunod.
- Geng, H., Li, J., Xiong, X., Lin, X. (2016). Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy, *Science and Technology of welding and joining*, DOI: 10.1080/13621718.2016.1259031.
- Gibson, B., Bandari, Y. K., Richardson, B., Roschli, A., Post, B., Borish, M., ... & Love, L. (2019). Melt pool monitoring for control and data analytics in large-scale metal additive manufacturing. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M., (1984). "A new finite element model for welding heat sources", *Metall. Mater. Trans. B*, 15, 299–305.
- Gonçalves, D. A., Stemmer, M. R., & Pereira, M. (2019). A convolutional neural network approach on bead geometry estimation for a laser cladding system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-11.
- Grad, L., Grum, J., Polajnar, I., & Slabe, J. M. (2004). Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(5), 555-561.
- Haley, J. C., Zheng, B., Bertoli, U. S., Dupuy, A. D., Schoenung, J. M., & Lavernia, E. J. (2019). Working distance passive stability in laser directed energy deposition additive manufacturing. *Materials & Design*, 161, 86-94.
- Halmshaw, R., (1996). Introduction to the Non-destructive Testing of Welded Joints, second ed., *Abington Publishing*, Cambridge.
- Han, Q., Li, Y., & Zhang, G. (2018). Online Control of Deposited Geometry of Multi-layer Multi-bead Structure for Wire and Arc Additive Manufacturing. In *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 85-93. Springer, Singapore.
- Hascoët, J-Y. (1989). Etude de la zone fondue et de l'usure des électrodes en relation avec les données technologiques du soudage TIG en vue d'applications en robotique, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- Heigel, J. C., Michaleris, P., & Palmer, T. A. (2015). In situ monitoring and characterization of distortion during laser cladding of Inconel® 625. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 135-145.
- Hejripour, F., Binesh, F., Hebel, M., & Aidun, D. K. (2019). Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 272, 58-71.

- Henckell, P., Günther, K., Ali, Y., Bergmann, J. P., Scholz, J., & Forêt, P. (2017). The influence of gas cooling in context of wire arc additive manufacturing—a novel strategy of affecting grain structure and size. In *TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings* (pp. 147-156). Springer, Cham.
- Heralić, A., Christiansson, A. K., & Lennartson, B. (2012). Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning. *Optics and lasers in engineering*, 50(9), 1230-1241.
- Hofman, J. T., Pathiraj, B., Van Dijk, J., De Lange, D. F., & Meijer, J. (2012). A camera-based feedback control strategy for the laser cladding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11), 2455-2462.
- Horvat, J., Prezelj, J., Polajnar, I., & Čudina, M. (2011). Monitoring gas metal arc welding process by using audible sound signal. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 57(3), 267-278.
- Hu, D., & Kovacevic, R. (2003). Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(1), 51-60.
- Hui, L., Dai, B. Q., & Wei, L. (2006, May). A pitch detection algorithm based on AMDF and ACF. In *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings* (Vol. 1, pp. I-I). IEEE.
- Javadi, Y., Macleod, C. N., Pierce, S. G., Gachagan, A., Kerr, W., J. Ding., Williams, S., Vasilev, M., Su, R., Mineo and Dziewrez, J. (2019). Ultrasonic phased array inspection of wire+arc additive manufacture samples using conventional and total focusing method imaging approaches, *Insight*, 61, 298-306.
- Karnati, S., Matta, N., Sparks, T., Liou F., (2013). Vision-based process monitoring for laser metal deposition processes, 24th *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX.
- Keeler, M. (2011). The effects of heat input and interpass temperature on the microstructure of duplex SS during welding, PhD Manuscript, Cranfield University.
- Kerninon, J., Mognol, P., Hascoët, J. Y., & Legonidec, C. (2008). Effect of path strategies on metallic parts manufactured by additive process. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 352-361).
- Khanafer, K., Al-Masri, A., Aithal, S., & Deiab, I. (2019). Multi-physics modeling and simulation of laser additive manufacturing process. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(2), 537-544.

- Kissinger, T., Gomis, B., Ding, J., Williams, S. W., & Tatam, R. P. (2019). Measurements of Wire+ Arc additive manufacturing layer heights during arc operation using coherent range-resolved interferometry (CO-RRI).
- Knezović, N., Dolsak, B., (2018). In-process non-destructive ultrasonic testing application during wire plus arc additive manufacturing, *Advances in production Engineering & Management*, 13 (2), 158-168.
- Kobryn, P. A., & Semiatin, S. L. (2003). Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 135(2-3), 330-339.
- Koester, L. W., Taheri, H., Bigelow, T. A., Bond, L. J., & Faierson, E. J. (2018, April). In-situ acoustic signature monitoring in additive manufacturing processes. *In AIP Conference Proceedings (Vol. 1949, No. 1, p. 020006)*. AIP Publishing.
- Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—a review. *International Materials Reviews*, 61(5), 361-377.
- Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., & Chamzas, C. (2014). Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), 73-79.
- Krautkramer, J., Krautkramer, H. (1990). *Ultrasonic Testing of materials*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lecomte, M. (2001). Cours et exercices sur la Transformation de Fourier, Ecoles des Mines de Douais.
- Le Jeune, L., Robert, S., Membre, A., Prada, C. (2015). Adaptative ultrasonic imaging with the total focusing method for inspection of complex components immersed in water, *41<sup>st</sup> annual review of progress in quantitative non-destructive evaluation*, 34, Boise, Idaho, 1037-1046.
- Li, F., Chen, S., Shi, J., Zhao, Y., & Tian, H. (2018). Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. *Applied Sciences*, 8(2), 207.
- Li, F., Chen, S., Shi, J., & Zhao, Y. (2019). In-process control of distortion in wire and arc additive manufacturing based on a flexible multi-point support fixture. *Science and Technology of Welding and Joining*, 24(1), 36-42.
- Li, C., Denlinger, E. R., Gouge, M. F., Irwin, J. E., & Michaleris, P. (2019). Numerical verification of an Octree mesh coarsening strategy for simulating additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, 30, 100903.
- Li, Z., Zhang, Z., Shi, J., & Wu, D. (2019). Prediction of surface roughness in extrusion-based additive manufacturing with machine learning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 488-495.

- Liu, H., Sparks, T., Liou, F., & Dietrich, D. M. (2015). Residual stress and deformation modelling for metal additive manufacturing processes. *Proc. World Congr. Mech. Chem. Mater. Eng.*(MCM 2015).
- Loh, G. H., Pei, E., Harrison, D., & Monzon, M. D. (2018). An overview of functionally graded additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 23, 34-44.
- Lopez, A., Bacelar, I., Pires, I., Santos, T., Quintino, L. (2017). Mapping of non-destructive techniques for inspection of wire + arc additive manufacturing, *Proceedings of 7<sup>th</sup> Int. Conf on Mechanics and Materials in Desing, Portugal*, 1829-1844.
- Lopez, A., Bacelar, R., Pires, I., Santos, T. G., Sousa, J. P., Quintino, L., (2018). Non-destructing testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 21, 298-306.
- Lopez, A. B., Santos, J., Sousa, J. P., Santos, T. G., & Quintino, L. (2019). Phased Array Ultrasonic Inspection of Metal Additive Manufacturing Parts. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38(3), 62.
- Lu, Y., & Wang, Y. (2018). Monitoring temperature in additive manufacturing with physics-based compressive sensing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 60-70.
- Lundqvist, B. (1977). *Sandvik Welding Handbook*, Sandvik AB, 1977.
- Maetz, J. Y. (2014). *Évolution de la microstructure d'un acier inoxydable lean duplex lors du vieillissement*. Thèse de Doctorat, INSA Lyon.
- Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G., & Quintino, L. (2019). Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. *Additive Manufacturing*, 25, 545-550.
- Marvasti, M., Bond, J., Matheson, M., & Sinclair, A. N. (2014). Phased array inspection at elevated temperatures: effects of ultrasonic beam skew. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 56(5), 256-263.
- Mattei, S. (2005). Rayonnement thermique des matériaux opaques, *Techniques de l'ingénieur, BE8210 V1*.
- Medina, J.R.I., (2012). Development and application of a CFD model of LMD. PhD Manuscript, University of Manchester.
- Michaleris, P. (2014). "Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes". *Journal of Finite Elements in Analysis and Design*, 86, 51-60.

- Millon, C., Vanhoye, A., Obaton, A. F., & Penot, J. D. (2018). Development of laser ultrasonics inspection for online monitoring of additive manufacturing. *Welding in the World*, 62(3), 653-661.
- Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scipaa, A., & Campatelli, G. (2018). Idle time selection for WAAM: a FE-based technique. *J Additive Manufacturing* 21, 479-486.
- Morris, R. A., Tate, R. C., & Matteson, M. A. (1994). U.S. Patent No. 5,306,893. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Moussion, A. (2017). Airbus installe la première pièce métallique imprimée en 3D sur un appareil de série, <http://www.primante3d.com/aibus-metal-14092017/>.
- Muller, P. (2013). Fabrication additive de pièces multi-matériaux. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- Muller, P., Mognol, P., & Hascoet, J. Y. (2012, July). Functionally graded material (FGM) parts: from design to the manufacturing simulation. In *ASME 2012 11<sup>th</sup> Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* (pp. 123-131). American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Nadimpalli, V. K., Na, J. K., Bruner, D. T., King, B. A., Yang, L., & Stucker, B. E. (2016). In-situ non-destructive evaluation of ultrasonic additive manufactured components. In *Solid Freeform Fabrication: 27<sup>th</sup> Annual International, Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference (TOC)*, Austin, TX, Aug (pp. 8-10).
- Ogino, Y., Asai, S., & Hirata, Y. (2018). Numerical simulation of WAAM process by a GMAW weld pool model. *Welding in the World*, 62(2), 393-401.
- Pajani, D., (2013). Thermographie – principe et mesure, *Techniques de l'ingénieur*, R2740 V2.
- Pal, K., Bhattacharya, S., & Pal, S. K. (2009). Prediction of metal deposition from arc sound and weld temperature signatures in pulsed MIG welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(11-12), 1113.
- Papacharalampopoulos, A., Stavropoulos, P., & Stavridis, J. (2018). Adaptive control of thermal processes: laser welding and additive manufacturing paradigms. *Procedia CIRP*, 67, 233-237.
- Patterson, D. A., Hennessy, J. L., & Goldberg, D. (1990). *Computer architecture: a quantitative approach* (Vol. 2). San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- Péchet, G., Hascoët, J.-Y., Rauch, M., & Rückert, G., Thorr, A.-S. (2019). Manufacturing of a hollow propeller blade with WAAM process - From the material characterisation to the achievement, Conférence S2M.

- Petrovič, D. S., Pirnat, M., Klancnik, G., Mrvar, P., & Medved, J. (2012). The effect of cooling rate on the solidification and microstructure evolution in duplex stainless steel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(3), 1185-1191.
- Pickin, C. G., & Young, K. (2006). Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(5), 583-585.
- Pillot, S. (2016). Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques, Techniques de l'ingénieur.
- Poulhaon, F., Rauch, M., Leygue, A., Hascoët, J. Y., & Chinesta, F. (2014). Online prediction of machining distortion of aeronautical parts caused by re-equilibration of residual stresses. In *Key Engineering Materials* (Vol. 611, pp. 1327-1335). Trans Tech Publications Ltd.
- Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview, *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.
- Purtonen, T., Kalliosaari, A., & Salminen, A. (2014). Monitoring and adaptive control of laser processes. *Physics Procedia*, 56, 1218-1231.
- Quaranta, G., Haug, E., Duval, J. L., & Chinesta, F. (2020). Parametric evaluation of part distortion in additive manufacturing processes. *International Journal of Material Forming*, 13(1), 29-41.
- Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., & Hascoët, J. Y. (2018). Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. *Welding in the World*, 62(2), 259-266.
- Quérard, Q. (2019). Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- Rauch, M., Hascoët, J. Y., Hamann, J. C., & Plenel, Y. (2009). Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. *Computer-Aided Design*, 41(12), 877-885.
- Rauch, M., Laguionie, R., & Hascoët, J. Y. (2014). A STEP-NC approach for multi-process manufacturing, simulation and optimisation. *International Journal of Product Development* 20, 19(1-3), 21-38.
- Rasmussen, C. E., & Williams, C. K. I., (2006). *Gaussian processes for machine learning*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Rieder, H., Dillhofer, A., Spies, M., (2015). Ultrasonic Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Based on Selective Laser Melting. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive and Evaluation*, 1650 (1), 84-191.

Rivette, M., Mognol, P., & Hascoet, J. Y. (2013). Method to obtain hybrid rapid tools with elementary component assembly. *Rapid Prototyping Journal*.

Rodrigues, T. A., Duarte, V., Avila, J. A., Santos, T. G., Miranda, R. M., & Oliveira, J. P. (2019). Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 27, 440-450.

Rousseau, B., Gomart, H., Meneses, D. D. S., Echegut, P., Rieu, M., Dugas, R., ... & Ansart, F. (2011). Modelling of the radiative properties of an opaque porous ceramic layer. *Journal of electroceramics*, 27(2), 89-92.

Saad, E., Wang, H., & Kovacevic, R. (2006). Classification of molten pool modes in variable polarity plasma arc welding based on acoustic signature. *Journal of materials processing technology*, 174(1-3), 127-136.

Saini, D., & Floyd, S. (1998). An investigation of gas metal arc welding sound signature for on-line quality control. *Welding Journal-New York*, 77, 172-s.

Salehi, D., & Brandt, M. (2006). Melt pool temperature control using LabVIEW in Nd: YAG laser blown powder cladding process. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 29(3-4), 273-278.

Selvi, S., Vishvakshenan, A., & Rajasekar, E. (2018). Cold metal transfer (CMT) technology-An overview. *Defence technology*, 14(1), 28-44.

Shi, T., Lu, B., Shen, T., Zhang, R., Shi, S., & Fu, G. (2018). Closed-loop control of variable width deposition in laser metal deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9-12), 4167-4178.

Sieurin, H., & Sandström, R. (2006). Austenite reformation in the heat-affected zone of duplex stainless steel 2205. *Materials Science and Engineering: A*, 418(1-2), 250-256.

Smetannikov, O. Y., Maksimov, P. V., Trushnikov, D. N., Permyakov, G. L., Belenkiy, V. Y., & Farberov, A. S. (2019). Numerical 3D simulation of wire deposition process to predict distortion of parts. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 5(1), 3.

Smurov, I., Doubenskaia, M., & Zaitsev, A. (2013). Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation. *Surface and Coatings Technology*, 220, 112-121.

Song, L., Bagavath-Singh, V., Dutta, B., & Mazumder, J. (2012). Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1-4), 247-256.

- Soundararajan, V., Zekovic, S., & Kovacevic, R. (2005). Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(14), 1577-1587.
- Stützer, J., Totzauer, T., Wittig, B., Zinke, M., & Jüttner, S. (2019). GMAW Cold Wire Technology for Adjusting the Ferrite–Austenite Ratio of Wire and Arc Additive Manufactured Duplex Stainless Steel Components. *Metals*, 9(5), 564.
- Sukumaran, P (2009). Practical challenges during high-temperature ultrasonic scanning. 5<sup>th</sup> Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Bahrain.
- Taminger, K. M., & Hafley, R. A. (2006). Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing, ntrs.nasa.gov.
- Tang, L., & Landers, R. G. (2011). Layer-to-layer height control for laser metal deposition process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133(2), 021009.
- Tapia, G., & Elwany, A. (2014). A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6).
- Touzé, S. (2019). Laser Metal Deposition of Aluminium-Copper allots for Repair applications, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- Van Belle, L., Vansteenkiste, G., & Boyer, J. C. (2012). Comparisons of numerical modelling of the Selective Laser Melting. In *Key engineering materials* (Vol. 504, pp. 1067-1072). Trans Tech Publications Ltd.
- Van Bohemen, S. M. C., Hermans, M. J. M., & Den Ouden, G. (2001). Monitoring of martensite formation during welding by means of acoustic emission. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(22), 3312.
- Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., & Campatelli, G. (2016). Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features. *Procedia CIRP*, 55, 95-100.
- Wang, Y., & Zhao, P. (2001). Noncontact acoustic analysis monitoring of plasma arc welding. *International journal of pressure vessels and piping*, 78(1), 43-47.
- Wang, L., Jiang, X., Zhu, Y., Zhu, X., Sun, J., & Yan, B. (2018). An approach to predict the residual stress and distortion during the selective laser melting of AlSi10Mg parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9-12), 3535-3546.
- Wasmer, K., Kenel, C., Leinenbach, C., & Shevchik, S. A. (2017, September). In situ and real-time monitoring of powder-bed AM by combining acoustic emission and artificial intelligence. In *International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications*, pp. 200-209, Springer, Cham.

- Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire+ arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(7), 641-647.
- Woo, Y. Y., Han, S. W., Oh, I. Y., Moon, Y. H., & Ha, W. (2019). Control of Directed Energy Deposition Process to Obtain Equal-Height Rectangular Corner. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(12), 2129-2139.
- Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., Fei, Z. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 304-312.
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Fei, Z. (2018). The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 258, 97-105.
- Wu, H., Yu, Z., & Wang, Y. (2019). Experimental study of the process failure diagnosis in additive manufacturing based on acoustic emission. *Measurement*, 136, 445-453.
- Xiong, J., Zhang, G., Qiu, Z., & Li, Y. (2013). Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 41, 82-88.
- Xiong, J., & Zhang, G. (2014). Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 962-968.
- Xiong, J., Li, Y., Li, R., & Yin, Z. (2018). Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 252, 128-136.
- Xiong, J., Pi, Y., & Chen, H. (2019). Deposition height detection and feature point extraction in robotic GTA-based additive manufacturing using passive vision sensing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59, 326-334.
- Xu, F., Madhavan, N., Dhokia, V., McAndrew, A. R., Colegrove, P. A., Williams, S., ... & Newman, S. T. (2016). Multi-sensor system for wire-fed additive manufacture of titanium alloy. In *26th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Seoul (North Korea)*.
- Xu, N., Shi, Y. W., He, F. C., Yang, P. H., (2017). Ultrasonic array inspection for Additive Manufacturing components using Full Matrix Capture, *15<sup>th</sup> Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing*, Singapore.
- Yan, Z., Liu, W., Tang, Z., Liu, X., Zhang, N., Li, M., & Zhang, H. (2018). Review on thermal analysis in laser-based additive manufacturing. *Optics & Laser Technology*, 106, 427-441.

Yang, D., Wang, G., Zhang, G. (2017). Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography, *Journal of Materials Processing Technology*, 244, 215–224.

Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, 2(4), 041101.

Yu, Z., Zheng, Y., Chen, J., Wu, C., Xu, J., Lu, H., & Yu, C. (2020). Effect of laser remelting processing on microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel during laser direct metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 116738.

Zhou, X., Zhang, H., Wang, G., Bai, X., (2017). Three-dimensional numerical simulation of arc and metal transport in arc welding based additive manufacturing, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 521–537.

**Titre :** Méthodologie de *monitoring* multiphysique des procédés DED : développement par une démarche expérimentale

**Mots clés :** *Monitoring*, Fabrication Additive, DED, LMD, WAAM

**Résumé :** La Fabrication Additive métallique apporte de nouvelles possibilités de fabrication et de liberté de conception des pièces fonctionnelles métalliques par rapport aux procédés conventionnels. En particulier, les technologies *Direct Energy Deposition* (DED), notamment les procédés *Laser Metal Deposition* (LMD) et *Wire-Arc Additive Manufacturing* (WAAM) fusionnent directement la matière et la déposent couche par couche pour réaliser une pièce. Actuellement, ces procédés sont majoritairement mis en œuvre en boucle ouverte. Ainsi, l'obtention d'une pièce conforme aux exigences du cahier des charges résulte le plus souvent d'une méthode essai-erreur. Afin d'améliorer la maîtrise des procédés DED et de s'affranchir de cette méthode essai-erreur, la simulation numérique et le *monitoring* sont les principales pistes investiguées dans la littérature.

Cette thèse propose une méthodologie générique de *monitoring* multiphysique, basée sur quatre boucles de contrôle indépendantes et pouvant être mises en œuvre simultanément. Ces boucles de contrôle se focalisent sur la température, la géométrie et la santé matière de la pièce, ainsi que sur le *Stick Out*. Dans ces travaux, les boucles de contrôle ont été principalement implémentées sur le procédé WAAM. Un soin particulier a été porté sur leur développement pour rendre ces boucles de contrôle adaptables au procédé LMD. Parallèlement à ces travaux, certains outils numériques existants ont été évalués dans l'optique d'être intégrés dans l'environnement de fabrication aux côtés du *monitoring*. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du laboratoire commun Joint Laboratory of Marine Technology regroupant Naval Group et Centrale Nantes.

**Title :** Multiphysics monitoring methodology for DED processes: development with an experimental approach

**Keywords :** Monitoring, Additive Manufacturing, DED, LMD, WAAM

**Abstract :** Additive Manufacturing (AM) is a promising technology compared to subtractive processes, in terms of cost or freedom of manufacturing functional parts. Among the AM techniques, Laser Metal Deposition (LMD) and Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM), included in the Direct Energy Deposition (DED) processes, manufacture parts by directly melting the material in a layer-by-layer manner. Those processes are currently mainly operated in open-loop. Thus, an acceptable part regarding the specified specifications is often the result of a trial-and-error method. In order to improve DED processes performances and to get rid of this trial-and-error method, monitoring and numerical simulation are the most widely investigated solutions.

These PhD works propose a generic multiphysics monitoring methodology, based on four independent control loops which can be operated simultaneously. Those control loops are dedicated to the part temperature, geometry, and structural health, and the *Stick Out*. In these PhD works, control loops have been mainly implemented on the WAAM process, and a specific attention has been devoted to their developments to ensure their applicability to the LMD process. Concurrent to these monitoring developments, an evaluation of some existing numerical tools has been conducted, in order to integrate simulation together with monitoring in a manufacturing environment. This PhD project is part of the Joint Laboratory of Marine Technology formed by Naval Group and Centrale Nantes.