



HAL
open science

Modèle d'aide à la décision pour le choix des paramètres de fabrication du procédé WAAM : prise en compte des critères de performances mécaniques et industrielles durables

Laurent Terrenoir

► To cite this version:

Laurent Terrenoir. Modèle d'aide à la décision pour le choix des paramètres de fabrication du procédé WAAM : prise en compte des critères de performances mécaniques et industrielles durables. Automatique. Université de Bordeaux, 2023. Français. NNT : 2023BORD0370 . tel-04381993

HAL Id: tel-04381993

<https://theses.hal.science/tel-04381993>

Submitted on 9 Jan 2024

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.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR
DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX
PRÉPARÉE À L'ESTIA

ÉCOLE DOCTORALE SPI

Automatique, productique, signal et image, ingénierie cognitive

Par **Laurent TERRENOIR**

Modèle d'aide à la décision pour le choix des paramètres de fabrication du procédé WAAM : prise en compte des critères de performances mécaniques et industrielles durables

Sous la direction de : **Christophe MERLO**

Sous la supervision de : **Julie LARTIGAU et Laura LAGUNA SALVADO**

Soutenue le 07/12/2023

Membres du jury :

M. Emmanuel DUC	Professeur, SIGMA Clermont	Président
Mme. Lamia BERRAH	Professeur, Université Savoie Mont-Blanc	Rapporteuse
M. Olivier KERBRAT	Professeur, ENS Rennes	Rapporteur
Mme. Mélanie DESPEISSE	Associate Professor, Chalmers University of Technology	Examinatrice
Mme. Julie MARTEAU	MCF, Université de Technologie de Compiègne	Examinatrice
M. Christophe MERLO	Professeur, ESTIA Recherche	Directeur
M. Arun ARJUNAN	Professor, University of Wolverhampton	Invité
Mme Laetitia KIRSCHNER	Cheffe de Projet Fabrication Additive, SNCF Voyageurs	Invitée

Titre de la thèse :

Modèle d'aide à la décision pour le choix des paramètres de fabrication du procédé WAAM : prise en compte des critères de performances mécaniques et industrielles durables

Mots-Clés : DED, WAAM, indicateurs de performances, durabilité, maturité industrielle, aide à la décision, comportement mécanique

Résumé :

Les procédés de fabrication additive métallique de dépôt sous énergie concentrée (Directed Energy Deposition - DED) sont encore peu matures malgré les nombreux travaux de recherche menés à leur sujet dans les dernières années. Pour contribuer à l'intégration industrielle des procédés DED, la maîtrise des performances mécaniques et industrielles durables est impérative. Ces travaux de thèse proposent un cadre méthodologique outillé pour faciliter la mise en œuvre de ces procédés via le choix de paramètres de fabrication pertinents.

La première étape est le développement d'un modèle d'évaluation de la maturité pour supporter le choix d'une technologie DED pour un cas d'application envisagé. Puis un modèle de performances est défini et appliqué pour le cas d'étude choisi. Il s'agit du procédé WAAM-CMT pour la fabrication d'une pièce en acier 316L. Le modèle prédictif développé permet de lier les performances mécaniques et industrielles durables (force maximale admissible, précision dimensionnelle, temps de fabrication, coût de fabrication et impact environnemental) aux paramètres de fabrication les plus influents : la vitesse d'avance de fil et la vitesse de déplacement du robot. L'application de ce modèle met en lumière la divergence des paramètres de fabrication à choisir pour obtenir les performances optimales. La dernière étape du cadre de référence proposé présente le développement d'un modèle d'aide à la décision permettant le choix des paramètres de fabrication selon les critères de performances ciblés.

Ainsi, ces travaux contribuent à l'industrialisation des procédés DED, en présentant un cadre méthodologique à étendre à d'autres applications. Dans le cadre de cette thèse, le choix des paramètres optimaux au vu des performances mécaniques et industrielles durables a été investigué pour la fabrication d'une pièce en WAAM en acier 316L.

Title of the thesis:

A decision support model to choose the WAAM process parameters considering both mechanical and sustainable performance indicators

Keywords: DED, performance indicators, industrial maturity, decision support, WAAM, mechanical behavior, sustainability

Abstract:

The metal additive manufacturing processes of Directed Energy Deposition (DED) are still not very mature, despite the numerous research projects carried out on them in recent years. To contribute to the industrial integration of DED processes, it is imperative to control the mechanical quality of the produced parts and the sustainability of the manufacturing process. This thesis proposes a methodological framework to facilitate the implementation of these technologies by selecting relevant manufacturing parameters.

The first step involves developing a maturity assessment model to support the selection of a DED technology for a specific use case. Subsequently, a performance model is developed for the chosen case study, which focuses on the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of a 316L stainless steel part. The developed predictive model establishes the analytics relations between mechanical and sustainable performance (such as load-bearing force, dimensional accuracy, manufacturing time, cost, and environmental impact) and the studied WAAM process parameters, namely, wire feed speed and travel speed. This model highlights the conflicts that arise between the analyzed performances when choosing the manufacturing parameters. To address this issue, the proposed framework's final step presents the implementation of a decision support model that enables the selection of manufacturing parameters based on the decision maker's prioritization of performance factors.

Thus, this work contributes to the industrial development of DED processes by presenting a methodological framework that can be extended to other applications. This thesis investigates the selection of optimal parameters considering sustainable mechanical and industrial performance for WAAM in 316L steel.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. le président du jury, Emmanuel Duc. J'ai apprécié vous retrouver dans mon jury de thèse après mes années à l'IFMA. La boucle est bouclée. Merci aux rapporteurs de ce travail de thèse, Lamia Berrah et Olivier Kerbrat. Vos retours, très intéressants et justes, me motivent à poursuivre dans la voie de la recherche. Merci à Julie Marteau, Melanie Despeisse, et Leatitia Kirshner pour leur participation à mon jury de thèse.

Arun, I thank you very much for your presence here, it was really nice having you to share this work and thank you very much for your welcome and help. I want also to address my gratitude to everybody I met and worked with at the university of Wolverhampton, Peter, John, Iain, Paul, Andrew, Neil, Georges. Arun, I hope we will be able to continue working together in the future.

Merci à mon directeur de thèse, Christophe. Merci pour ta confiance, tes conseils avisés, ton implication, ta réactivité et ta compréhension chaque fois que j'en ai eu besoin ainsi que ta compréhension.

Je tiens à remercier tout particulièrement Julie Lartigau et Laura Laguna Salvado, mes encadrantes de thèse pendant ces trois ans. Merci pour votre implication, pour votre patience et votre écoute. Merci de m'avoir toujours poussé à faire mieux. Un remerciement tout spécial à Elliott et Oriol qui m'ont accordé quelques mois peut-être plus tranquilles en début de thèse.

J'adresse mes remerciements à Patxi Elissalde, à la communauté d'agglomération Pays-Basque et à l'ensemble des personnels de l'ESTIA et d'ESTIA Recherche pour leur soutien financier et logistique pendant ces trois ans.

Merci à tous ceux qui m'ont accompagné dans les cours, dans la réalisation des expérimentations, ou pour discuter autour d'un café ou d'une bière (ou plusieurs). Merci Audrey, Véro, Eric, Dim, Denis, Pierre M, Antoine L, Cynthia, Camille V., Sarah, Stélian, Quentin, Alexia, Adama, Yeyha, Mohammad, Remi, Naoures. Merci aux doctorants et particulièrement à Camille B. qui m'a évité de finir ma thèse à la rue.

Merci à mes amis rencontrés à l'IFMA, pour leur soutien dans cette grande aventure et leur présence lors de la soutenance. Merci Nathan, Edouard, Yoann, Louis, Jack, Camille, Louise, Béré, Alizé, Baptiste, Johanna, Couz et Greg.

Je remercie la famille de Valentine, merci Patricia, Olivier, Pao et Sarah pour votre soutien et ces bon moments partagés.

Enfin je remercie mes parents, pour votre présence aujourd'hui, pour votre soutien moral et financier toutes ces années et pour la formidable famille que vous avez formé. Je remercie mes frères et sœurs, mes belles sœurs et mon beau-frère. Merci à Stéphane, Anne, Frédéric, Elise, Guillaume, Sese, Anne-Marie, Benoît, Chantal et Romain. Merci également à mes neveux et

nièces, Marion, Gabriel, Noémie, Nicolas, Adrien, Eléonore, mon filleul Antoine et ma filleule Maëlys qui a eu la chance d'assister à une soutenance de thèse à 6 mois.

Pour finir, Vale merci de ton soutien sans faille malgré un océan de distance. J'ai hâte de nos prochaines aventures.

Table des matières

Liste des figures	ix
Liste des tables	xii
Abréviations	xiv
Notations	xv
Introduction générale	1
Chapitre 1. Positionnement des travaux.....	5
1.1. Les procédés DED	6
1.2. État des lieux de l'industrialisation des procédés DED	9
1.3. Problématique, méthodologie et plan du manuscrit	14
1.4. Application pour le choix des paramètres du procédé WAAM-CMT	17
1.5. Conclusion	23
Chapitre 2. Proposition d'un modèle d'évaluation de la maturité des procédés DED..	25
2.1. Méthodologie suivie.....	27
2.2. IDENTIFIER. État de l'art sur l'évaluation de la maturité industrielle	28
2.3. DÉFINIR le périmètre du système étudié	36
2.4. CONCEVOIR le modèle	38
2.5. APPLIQUER le modèle pour choisir un TUCC	43
2.6. VALIDER le modèle	47
2.7. Conclusion	51
Chapitre 3. Définition d'un modèle de performances pour le procédé WAAM-CMT ..	54
3.1. État de l'art : mesure de la performance	56
3.2. Méthodes de modélisation des performances	69
3.3. Le modèle de performances proposé.....	74
Chapitre 4. Modèle de performances pour la fabrication d'un mur en acier 316L.....	77
4.1. Fabrication des murs en acier 316L.....	79
4.2. Mesure des réponses	87
4.3. Calcul des indicateurs de performances	95
4.4. Modélisation prédictive	100
4.5. Conclusion	107
Chapitre 5. Aide à la décision pour le choix des paramètres de fabrication	109
5.1. Un problème d'aide à la décision	111
5.2. État de l'art : aide à la décision multicritère	115

5.3.	Modèle proposé	124
5.4.	Implémentation du modèle.....	128
5.5.	Application du modèle pour le choix des paramètres de fabrication.....	136
5.6.	Discussion sur le modèle proposé.....	144
5.7.	Conclusion	147
Conclusion Générale		149
	Contributions scientifiques et industrielles	149
	Perspectives.....	153
Bibliographie.....		155
Annexes		174
	Annexe du Chapitre 1.....	175
	Annexes du Chapitre 2.....	177
	Annexes du Chapitre 4.....	185
	Annexes du Chapitre 5.....	208
	Annexe de la Conclusion.....	217

Liste des figures

Fig. 0.1. Concept de la <i>Triple Bottom Line</i> par Elkington [5]	2
Fig. 1.1. Schéma du procédé LMD-P, adapté de Ahn [11]	6
Fig. 1.2. Schéma du procédé LMD-W, adapté de Ahn [11].....	7
Fig. 1.3. Schéma du procédé EBAM, adapté de Ahn [11]	7
Fig. 1.4. Schéma du procédé WAAM, adapté de Ahn [11].....	8
Fig. 1.5. Cycle de vie de pièces fabriquées par DED.....	10
Fig. 1.6. Cadre méthodologique outillé envisagé pour résoudre la problématique	15
Fig. 1.7. Cycle du CMT d'après Bourlet [26]	18
Fig. 1.8. Pièces industrielles fabriquées en WAAM-CMT : (a) pont fabriqué par MX3D et (b) hélice de bateau fabriquée par RAMLAB	18
Fig. 1.9. Pièces fabriquées dans le cadre des travaux de recherche de Williams [23] : (a) modèle d'aile d'avion pour soufflerie et (b) cône profilé	19
Fig. 1.10. Trajectoires de fabrication pour le WAAM d'après Singh [62] et Aldalur <i>et al.</i> [67] : (a) Trajectoire linéaire (b) Trajectoire zigzag (c) Trajectoire oscillatoire (d) Trajectoire spirale (e) Trajectoire hybride	20
Fig. 1.11. Arbre de décision pour la fabrication d'une pièce en WAAM	22
Fig. 1.12. Cas d'étude industriel : (a) géométrie simplifiée de la tête de préhension et (b) mur représentatif d'une géométrie de la pièce industrielle considérée	23
Fig. 2.1 Positionnement du chapitre 2 dans le cadre méthodologique de référence envisagé	26
Fig. 2.2. Méthodologie de conception d'un modèle d'évaluation de la maturité spécifique ...	27
Fig. 2.3. Cycle de vie technologique adapté de [89,90].....	28
Fig. 2.4. Pondération des critères dans le modèle AMRL proposé.....	42
Fig. 2.5. Application du modèle d'évaluation de la maturité proposé pour sélectionner un TUCC DED	43
Fig. 2.6. Exemple d'évaluation d'un sous-critère.....	44
Fig. 2.7. Méthodologie utilisée pour développer le modèle AMRL	52
Fig. 3.1 Positionnement du chapitre 3 dans le cadre méthodologique de référence envisagé	55
Fig. 3.2. Modèle de performances recherché	55
Fig. 3.3 Schéma présentant la différence entre la surface fabriquée (en noir) et la surface CAO (en bleu) en vue générale (a) et en coupe transversale (b) afin de calculer la précision dimensionnelle.....	69
Fig. 3.4. Obtention de la force maximale admissible par MEF.....	70
Fig. 3.5. Représentation des facteurs de coûts pour le cas d'application considéré	71
Fig. 3.6. Ressources et processus identifiés dans l'inventaire pour la modélisation de l'ACV	73
Fig. 3.7. Modèle de performances proposé pour le procédé WAAM-CMT	75
Fig. 3.8. Méthodologie pour le développement du modèle de performances proposé.....	76
Fig. 4.1. Positionnement du chapitre dans le cadre méthodologique de référence envisagé ..	78
Fig. 4.2. Présentation de la cellule robotisée WAAM.....	79

Fig. 4.3. Dimensions du mur et trajectoire de fabrication en vue isométrique (a) et vue de dessus (b)	81
Fig. 4.4. Schématisation du phénomène de recouvrement	81
Fig. 4.5. Fabrication des cordons selon les paramètres : (a) WFS = 5 m/min et TS = 0.6 m/min et (b) WFS = 7.5m/min et TS = 0.75 m/min.	82
Fig. 4.6. Profil de recouvrement (WFS = 10 m/min ; TS = 0.9 m/min ; $r = 25\%$) et mesures réalisées.....	83
Fig. 4.7. Recherche du taux de recouvrement optimal pour WFS = 10 m/min ; TS = 0.9 m/min	83
Fig. 4.8. Dispositif expérimental.....	84
Fig. 4.9. Localisation des éprouvettes en vue isométrique (a) et de coupe avec cotations en mm (b).....	85
Fig. 4.10. Dimensions des éprouvettes de traction.....	86
Fig. 4.11. Essai de traction sur une éprouvette équipée d'un extensomètre	87
Fig. 4.12. Photographies des neufs murs fabriqués selon les paramètres spécifiés dans la Table 4.5.....	89
Fig. 4.13. Courbes contrainte-déformation des éprouvettes de traction en fonction de ei et de la direction avec : (a) les échantillons verticaux et (b) les échantillons horizontaux.....	90
Fig. 4.14. Temps de soudage et de refroidissement des pièces fabriquées	92
Fig. 4.15. Taux de soudage en fonction de l'apport d'énergie	92
Fig. 4.16. Consommation de matière première pour les pièces fabriquées.....	93
Fig. 4.17. Ratio matière selon l'apport d'énergie	93
Fig. 4.18. Consommation de gaz pour les pièces fabriquées	94
Fig. 4.19. Consommation électrique pour les pièces fabriquées	94
Fig. 4.20. Comparaison par nuage de points avec Cloudsoftware	95
Fig. 4.21. Éco-score moyen pour les neuf pièces fabriquées, selon le flux d'entrée considéré.....	100
Fig. 4.22. Surface de réponse de la précision dimensionnelle selon l'équation 4.3.....	101
Fig. 4.23. Surface de réponse de la force maximale admissible adimensionnée selon l'équation 4.4.....	102
Fig. 4.24. Surface de réponse du temps de fabrication selon l'équation 4.5	103
Fig. 4.25. Surface de réponse du coût de fabrication selon l'équation 4.6	104
Fig. 4.26. Surface de réponse de l'éco-score selon l'équation 4.7.....	105
Fig. 5.1. Positionnement du chapitre 5 dans le cadre méthodologique de référence envisagé	110
Fig. 5.2. Modèle d'aide à la décision hybride proposé	114
Fig. 5.3. Illustration du front de Pareto d'après Gardeux [195].....	117
Fig. 5.4 Fonctionnement d'un algorithme génétique.....	118
Fig. 5.5. Méthodes d'aide à la décision choisies pour le modèle hybride proposé.....	124
Fig. 5.6. Modèle d'aide à la décision proposé, sous la forme du <i>service experience blueprinting</i>	125
Fig. 5.7. Interface de l'algorithme TAMARIN : hiérarchisation et granularité.....	133
Fig. 5.8. Interface de l'algorithme TAMARIN : classement et affichage des solutions	134

Fig. 5.9. Représentation graphique des solutions Pareto-optimales obtenues par l'algorithme NSGA II.....	137
Fig. 5.10. Ensemble des alternatives admissibles pour le cas d'étude considéré.....	137
Fig. 5.11. Ensembles des solutions Pareto-optimales pour le cas d'étude considéré	138
Fig. 5.12. Cartographie des alternatives Pareto-optimales par rapport à WFS et TS	139
Fig. 5.13. Hiérarchisation et granularité des critères pour le scénario 1	140
Fig. 5.14. Classement des meilleures alternatives sur l'interface TAMARIN selon le scénario 1	140
Fig. 5.15. Hiérarchisation et granularité des critères pour le scénario 2.....	141
Fig. 5.16. Classement des meilleures alternatives sur l'interface TAMARIN selon le scénario 2	142
Fig. 5.17. Hiérarchisation et granularité des critères pour le scénario 3.....	142
Fig. 5.18. Classement des meilleures alternatives sur l'interface TAMARIN selon le scénario 3	143
Fig. 6.1. Étapes menant au choix des paramètres de fabrication des procédés DED.....	149
Fig. 6.2. Cadre méthodologique outillé proposé pour le développement d'un modèle d'aide au choix des paramètres de fabrication des procédés DED.....	153

Liste des tables

Table 1.1. Principales caractéristiques industrielles des procédés DED adaptées de [11].....	9
Table 2.1. Échelles TRL et MRL adaptées en français d'après [102]	30
Table 2.2. Exemples de TUCC pour une même technologie de FAM	37
Table 2.3. Critères et sous-critères d'évaluation AMRL.....	38
Table 2.4. Échelle de maturité AMRL.....	41
Table 2.5. Évaluation des sous-critères pour les TUCC définis.....	45
Table 2.6. Scores AMRL des TUCC définis	46
Table 3.1. Catégories et unités considérées pour le calcul d'impact environnemental à partir de ReCiPe 2016 [142].....	61
Table 3.2. Comparaison des propriétés de traction obtenues dans diverses configurations ...	64
Table 3.3. Synthèse de l'influence des paramètres de fabrication du WAAM sur les performances.....	68
Table 4.1. Composition chimique du fil métallique d'apport.....	79
Table 4.2. Plan d'expériences factoriel complet	80
Table 4.3. Paramètres relatifs au procédé et à la stratégie de fabrication	80
Table 4.4. Propriétés géométriques des cordons en fonction de WFS et TS	84
Table 4.5. Paramètres nominaux de premier et second ordres.....	85
Table 4.6. Paramètres du premier et second ordres mesurés et estimés.....	88
Table 4.7 Mesures des dimensions des pièces fabriquées.....	89
Table 4.8. Valeurs des propriétés de traction obtenues expérimentalement	91
Table 4.9. Comparaison des caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable 316L fabriqué selon différents procédés.....	91
Table 4.10. Coefficients de corrélation	95
Table 4.11. Précision dimensionnelle des pièces fabriquées.....	96
Table 4.12. Résultats adimensionnés de la simulation par éléments finis	97
Table 4.13. Données fixes considérées pour notre étude de coût.....	98
Table 4.14. Résultats du calcul de coût en euros (€).....	98
Table 4.15. Résultats de de l'évaluation des impacts par ACV (catégories finales).....	99
Table 4.16. Synthèse du modèle obtenu pour la précision dimensionnelle	101
Table 4.17. Synthèse du modèle obtenu pour la force maximale admissible.....	102
Table 4.18. Synthèse du modèle obtenu pour le temps de fabrication.....	103
Table 4.19. Synthèse du modèle obtenu pour le coût de fabrication.....	104
Table 4.20. Synthèse du modèle obtenu pour l'éco-score.....	105
Table 4.21. Indicateurs de performances optimaux calculés à partir du modèle de connaissances développé.....	107
Table 5.1. Adéquation des algorithmes évolutionnaires pour le problème considéré.....	123
Table 5.2. Adéquation des méthodes MADM pour le problème considéré	123
Table 5.3. Illustration du format des données d'entrées de TAMARIN.....	133
Table 5.4. Liste des cinq meilleures alternatives pour le scénario 1	140

Table 5.5. Liste des cinq meilleures alternatives pour le scénario 2	141
Table 5.6. Liste des cinq meilleures alternatives pour le scénario 3	143
Table 5.7. Comparaison des meilleures alternatives par scénario	143

Abréviations

Par ordre d'apparition dans le texte.

FAM	Fabrication Additive Métallique
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
LMD-P	<i>Laser Metal Deposition - Powder</i>
LMD-W	<i>Laser Metal Deposition - Wire</i>
EBAM	<i>Electron Beam Additive Manufacturing</i>
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
QR	Question de Recherche
WFS	<i>Wire Feed Speed</i>
TS	<i>Torch Speed</i>
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
FA	Fabrication Additive
TRL	<i>Technology Readiness Levels</i>
MRL	<i>Manufacturing Readiness Levels</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
IRL	<i>Integration Readiness Levels</i>
DRL	<i>Design Readiness Levels</i>
AMRL	<i>Additive Manufacturing Readiness Levels</i>
TUCC	<i>Technology Use-Case Couples</i>
R&D	Recherche et Développement
MEF	Modélisation Éléments Finis
ABC	<i>Activity Based Costing</i>
ACV	Analyse de Cycle de Vie
DOE	<i>Design of Experiments</i>
ANOVA	<i>ANalysis Of VAriance</i>
DSS	<i>Decision Support System</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
MODM	<i>Multiple Objective Decision Making</i>
MADM	<i>Multiple Attribute Decision Making</i>
AE	Algorithme Évolutionnaire
SPEA II	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
SMS-EMOA	<i>S-Metric Selection - Evolutionary Multiobjective Optimisation Algorithm</i>
MOEA/D	<i>Multi Objective Evolutionary Algorithm / Decomposition</i>
AG	Algorithme Génétique
NSGA II	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
TOPSIS	<i>Techniques for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>

Notations

U	tension
I	courant
e_i	apport d'énergie du procédé WAAM-CMT
WFS	vitesse d'avance de fil
TS	vitesse d'avance de torche (ou de robot)
t_{ic}	temps inter-couche
T_{ic}	température inter-couche
E	module d'élasticité
A%	déformation à rupture
$R_{e0.2}$	limite d'élasticité
R_m	résistance mécanique
$d_{\%}$	précision dimensionnelle
σ_{VM}	contrainte équivalente de Von Mises
F_{max}	force maximale admissible
t_{fab}	temps de fabrication
C_{fab}	coût de fabrication
<i>Eco – score</i>	score d'impact environnemental
r	taux de recouvrement
d	période de balayage

Introduction générale

Un intérêt industriel croissant pour la Fabrication Additive Métallique

Les procédés de Fabrication Additive Métallique (FAM) promettent de révolutionner l'industrie. Leurs potentiels sont relevés sur toutes les phases du cycle de vie du produit [1,2]:

- lors des phases d'études et de conception, les procédés de FAM permettent le développement de nouveaux produits, utiles pour la société comme les implants chirurgicaux pour les applications médicales [3]. De plus, la conception des pièces existantes peut être optimisée afin de les rendre plus légères et plus robustes ;
- lors de l'étape de fabrication, les procédés de FAM permettent la réduction de la consommation d'énergie, de la consommation de matière première et de la production de déchets, comparés aux procédés conventionnels. La FAM permet également la réduction des étapes de fabrication et la relocalisation de la production ;
- lors de sa phase d'utilisation, un produit plus léger permet une consommation réduite du carburant, par exemple, pour des pièces dans le domaine du transport ;
- en fin de vie du produit, les possibilités de réparation et de fonctionnalisation permettent de diminuer les déchets et d'offrir de nouvelles opportunités de recyclages [2-4].

Ainsi, ces procédés apparaissent comme un moyen d'augmenter la rentabilité en proposant des meilleurs produits ou en réduisant les coûts de production. Pour les industriels, leur intégration est donc synonyme d'amélioration des performances de l'entreprise.

Mais la performance d'une entreprise ne se limite pas à la performance économique. Celle-ci est étendue par la notion de durabilité définie dans le concept du *Tripple Bottom Line*, proposé par Elkington [5] dans les années 90. Ce concept, aujourd'hui bien accepté dans la littérature, est illustré par la Fig. 0.1. **La durabilité est définie selon trois dimensions : économique, sociale et environnementale.** La dimension économique fait référence aux coûts et à la productivité. La dimension environnementale fait référence à l'atténuation et à la limitation de l'impact de l'entreprise sur l'environnement. La dimension sociale considère l'impact de l'entreprise sur ses employés et sur les populations affectées par les activités de l'entreprise.

Dans le contexte actuel, l'influence du secteur industriel, et plus précisément des industries manufacturières et métallurgiques, sur le changement climatique est désormais bien établie [6]. Conjointement, les réglementations, comme celles relatives à la réduction de déchets et à la consommation énergétique, se durcissent. L'image des entreprises auprès du consommateur est également influencée par leur engagement environnemental et social. Pour

ces raisons, les industriels sont de plus en plus sensibles à l'impact social et environnemental de leurs activités.

Les procédés de FAM apparaissent donc comme une solution intéressante à intégrer pour les entreprises manufacturières au vu d'une performance durable.

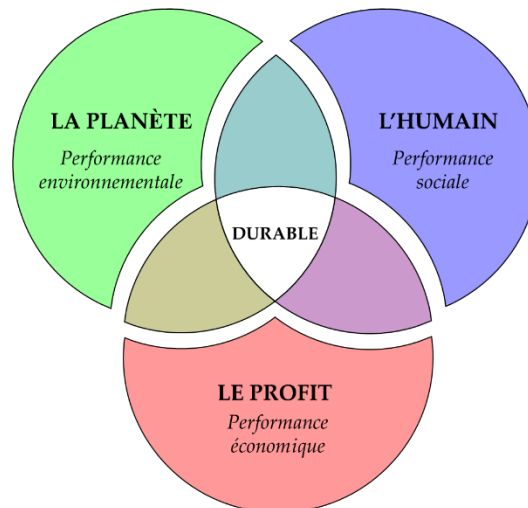


Fig. 0.1. Concept de la *Triple Bottom Line* par Elkington [5]

Mais ces procédés n'assurent pas systématiquement une amélioration des dites performances [4]. Par exemple, l'introduction de la FAM dans l'industrie peut entraîner une plus grande complexité dans la chaîne d'approvisionnement, en fonction de son intégration et de son utilisation [7]. Aussi, leur utilisation pose la problématique d'émission de substances nocives pour l'environnement et les opérateurs (fumées de soudage ou poudres métalliques par exemple). Par ailleurs, selon l'utilisation du procédé, la consommation de ressources peut être augmentée par rapport aux procédés conventionnels [8].

Pour être bénéfique aux performances de l'entreprise, l'intégration et la maîtrise des procédés de FAM est donc primordiale. On remarque aujourd'hui une inégale intégration des procédés de FAM dans l'industrie. Alors que les technologies dites de lit de poudre (*powder bed fusion* – PBF) sont déjà bien implantées, les technologies de dépôt de matière sous flux d'énergie dirigé (*Directed Energy Deposition* - DED) peinent à passer la porte des centres de recherche (laboratoires académiques ou plateformes R&D) pour être utilisées à échelle industrielle.

Les enjeux de l'intégration industrielle des procédés DED

Le DED est définie par la norme ISO - ISO/ASTM 52900:2021 [9] comme un procédé où l'énergie thermique focalisée est utilisée pour fusionner les matériaux, ici métalliques, en les fondant pendant leur dépôt. Ces nouvelles technologies sont prometteuses pour les industriels. Comparées aux procédé PBF, elles permettent notamment :

- la fabrication de pièces de grandes dimensions. La fabrication d'un seul tenant favorise la suppression des sous-assemblages et des étapes intermédiaires de fabrication. Cela a pour conséquence l'augmentation des cadences de production, la réduction du stockage, et la simplification de la chaîne de production ;
- l'augmentation des taux de dépôt de matière et donc la réduction des temps de fabrication ;
- de nouvelles possibilités de réparation et de fonctionnalisation.

Malgré ces promesses, **les procédés DED sont encore peu maîtrisés et leur intégration n'est pas une garantie de performance pour les entreprises manufacturières**. Ainsi, de plus en plus de travaux de recherche contribuent à développer les connaissances relatives aux procédés DED pour participer à leur essor industriel. Cependant, **celles-ci sont souvent compartimentées selon les domaines d'études** (mécanique, physique, économique, environnemental) et difficilement exploitables pour les industriels.

Ces travaux de thèse ont pour but de proposer une approche interdisciplinaire permettant de contribuer à l'industrialisation des procédés DED.

Nécessité d'une vision transverse

Ces travaux s'inscrivent dans une **démarche originale alliant mécanique et génie industriel**. En effet, l'étude des procédés de FAM nécessite cette double vision. D'une part, **l'étude des procédés** et des **phénomènes physiques** impliqués fait appel aux connaissances du domaine mécanique. D'autre part, **l'étude du système industriel** avec une vision systémique, qui concerne l'évaluation des **dimensions durables** ainsi que la conception et mise en œuvre de modèles et méthodes pour l'améliorer, fait appel aux connaissances du génie industriel.

L'interaction entre ces deux domaines est un point essentiel de ces travaux. En effet, les effets du procédés, dictés par les lois physiques, influent **simultanément** sur les dimensions durables du processus de fabrication et sur les caractéristiques physico-chimiques des pièces fabriquées. **Ces aspects sont interconnectés**. Enfin, la combinaison des approches et méthodes de chacun de ces domaines, permet la formalisation et le **développement de modélisations interdisciplinaires pour répondre aux enjeux d'industrialisation de la FAM**. Il semble donc nécessaire de les étudier conjointement. De cette manière, les enjeux abordés seront davantage représentatifs de la réalité industrielle qui n'est pas cloisonnée entre ces disciplines.

Contexte des travaux de recherche

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration internationale entre ESTIA Recherche (et sa plateforme technologique Addimadour¹) et le *Additive Manufacturing of Functional Materials Research Group* de l'Université de Wolverhampton, au Royaume-Uni. Ils ont été menés grâce au soutien financier de la communauté d'agglomération Pays-Basque, et de l'Université de Bordeaux (bourse de mobilité UBGRS et soutien à la mobilité internationale de l'ED SPI).

¹ Plateforme de recherche dédiée à la fabrication additive métallique grandes dimensions : <https://www.compositadour.com/expertises/nos-expertises-fabrication-additive>

Chapitre 1.

Positionnement des travaux

Sommaire

1.1. Les procédés DED.....	6
1.1.1. Laser Metal Deposition - Powder (LDM-P).....	6
1.1.2. Laser Metal Deposition - Wire (LMD-W).....	6
1.1.3. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM).....	7
1.1.4. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).....	8
1.1.5. Comparaison des procédés DED.....	9
1.2. État des lieux de l'industrialisation des procédés DED	9
1.2.1. Maitrise des performances des procédés DED.....	10
1.2.2. Choix des paramètres de fabrication pour les procédés DED.....	12
1.2.3. Sélection d'un procédé DED	13
1.3. Problématique, méthodologie et plan du manuscrit	14
1.4. Application pour le choix des paramètres du procédé WAAM-CMT	17
1.4.1. Fonctionnement du procédé	17
1.4.2. Paramètres de fabrication.....	19
1.4.3. Paramétrage du procédé WAAM-CMT.....	21
1.4.4. Avis des experts	22
1.4.5. Cas d'étude	23
1.5. Conclusion	23

Ce chapitre établit le positionnement de nos travaux afin de contribuer à l'intégration industrielle des procédés DED. Tout d'abord, en section 1.1, les procédés DED sont présentés et comparés selon leurs avantages et inconvénients pour l'industrialisation. Puis, la section 1.2 présente les enjeux et les freins à l'industrialisation de ces procédés. La section 1.3 détaille la problématique et présente notre proposition pour répondre à cette question. La section 1.4 présente le cas d'application couplé à notre proposition, avant de conclure en section 1.5.

1.1. Les procédés DED

Les procédés DED présentent des différences technologiques qui impactent leur utilisation et leur industrialisation. Ils sont usuellement catégorisés selon le type de source d'énergie utilisée (laser, faisceau d'électrons et arc électrique) et la forme du matériau d'apport (poudre et fil) [9].

1.1.1. Laser Metal Deposition - Powder (LDM-P)

LMD-P désigne le procédé de dépôt de métal sous forme de poudre par fusion laser, également connu sous le nom de *DED Powder Laser* ou *Laser Net Energy Shaping (LENS)*. Ce procédé met en œuvre un faisceau laser créant un bain de fusion dans lequel la poudre est projetée comme illustré en Fig. 1.1. Elle est ainsi fondue et l'opération est réitérée couche par couche [10,11].

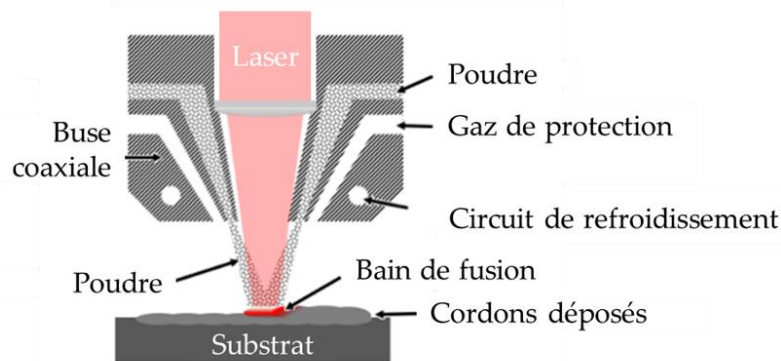


Fig. 1.1. Schéma du procédé LMD-P, adapté de Ahn [11]

Ce procédé nécessite la mise en place d'un environnement sécurisé, permettant la gestion de poudres métalliques. En effet, ces poudres très volatiles, peuvent être hautement inflammables, comme la poudre d'aluminium [11]. De plus, la taille des grains (45 - 105 μm) présente un risque grave pour la santé en cas d'inhalation.

Cette technique, permet d'obtenir des **pièces de petites ou moyennes dimensions**, avec une **précision élevée** et des **formes complexes** [12]. La vitesse de fabrication, supérieure à celle des systèmes PBF (environ 0,1 kg/h) [12], **ne dépasse pas 0,5 kg/h**. Cette technique est utilisée pour la fabrication, mais aussi pour des applications de réparation et de fonctionnalisation [11]. **Des machines LMD-P ont été commercialisées** par les entreprises Optomec Inc., Trumpf Inc. et Beam. Cette technologie a été utilisée pour fabriquer de pièces industrielles telles que des matrices d'estampage à chaud incorporant des circuits de refroidissement fermés [13]. Un autre cas d'application industrielle du LMD-P est la réparation d'armes militaires en Corée du Sud (KITECH 3D printing center) [11].

1.1.2. Laser Metal Deposition - Wire (LMD-W)

LMD-W désigne le dépôt de métal sous forme de fil par laser, également connu sous le nom de *DED Wire Laser* ou de *Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM)*. Ce procédé consiste en un faisceau laser qui fusionne un fil métallique déposé couche par couche, comme illustré en

Fig. 1.2 [14]. Cette technique est adaptée à la fabrication de **grandes pièces** et permet d'atteindre des **taux de dépôt élevés allant jusqu'à 2,8 kg/h**, mais la **précision géométrique des pièces fabriquées est faible** [15].

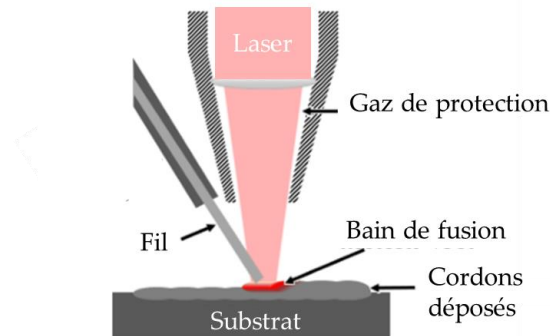


Fig. 1.2. Schéma du procédé LMD-W, adapté de Ahn [11]

Ce procédé est encore **rarement utilisé à échelle industrielle**, même si le *Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology* a commercialisé une machine LMD-W [15]. Les recherches actuelles sur ce procédé se concentrent sur des études de faisabilité de pièces en alliage de titane et en acier inoxydable [11].

1.1.3. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)

EBAM désigne le procédé utilisant un fil métallique et un faisceau d'électrons, également connu sous le nom de *DED Wire Electron Beam*, *Electron Beam Freeform Fabrication (EBF³)* ou *Electron Beam - Wire (EB-W)*. Le faisceau d'électrons crée un bain de fusion dans lequel le fil de matériau est introduit fondu et ainsi déposé couche après couche, comme illustré en Fig. 1.3 [16]. L'utilisation d'un faisceau d'électrons permet la **fabrication de matériaux hautement réfléchissants** et conducteurs tels que les alliages de cuivre, d'aluminium et de nickel. Ce procédé permet d'atteindre des **taux de fabrication très élevés à près de 19 kg/h** [17]. Cette technologie a été principalement développée par la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) et Sciaky Inc. Ce procédé est **utilisé dans les domaines aéronautiques et nucléaires** : des pièces de fusées et d'avions en alliage de titane, en inconel et en alliage d'aluminium ont notamment été fabriquées avec ce procédé [11,12].

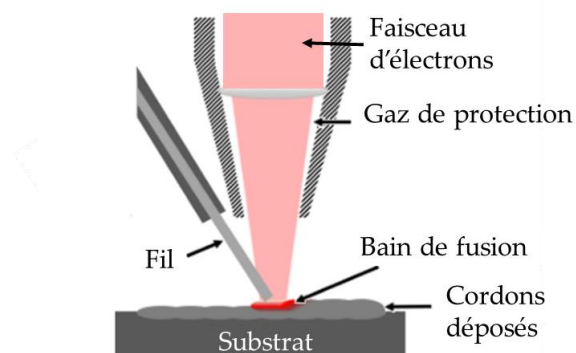


Fig. 1.3. Schéma du procédé EBAM, adapté de Ahn [11]

1.1.4. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Le WAAM désigne le procédé qui consiste à faire fondre un fil métallique au moyen d'un arc électrique, comme illustré en Fig. 1.4 [18]. Il est également connu comme *Electric Arc Wire (EAW)* ou *DED Wire Arc*. Les matériaux fréquemment utilisés en WAAM sont les alliages d'aluminium et de titane, et l'acier inoxydable. Les alliages d'aluminium et de titane sont utilisés principalement pour l'industrie aéronautique et les applications nécessitant des matériaux légers [19–23]. L'acier inoxydable est prisé pour la fabrication de pièces de structures de grandes dimensions, pour les industries de la défense, de l'énergie ou du transport [11,19,23]. Cette technologie permet de fabriquer des pièces de grande taille avec un **taux de dépôt élevé pouvant atteindre 4 à 6 kg/h**, mais avec une précision géométrique relativement faible [24]. Le WAAM offre également un **très bon rendement matériau** : la quantité de matériau composant la pièce fabriquée rapportée à la quantité de matériau consommé est proche de 100% [9,11,25].

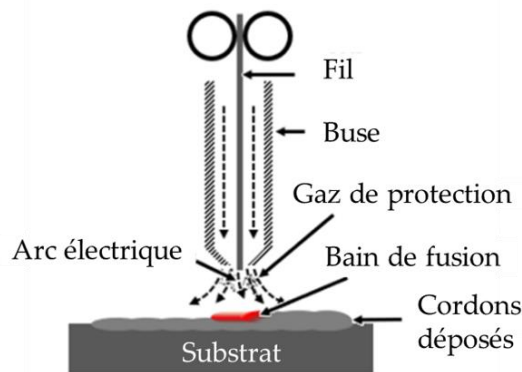


Fig. 1.4. Schéma du procédé WAAM, adapté de Ahn [11]

Cette technologie est souvent assimilée au soudage couche par couche [23]. Aussi, le WAAM se décline selon la technique de soudage mise en œuvre :

- le *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) correspond au procédé de soudage MIG (*Metal Inert Gas*). Ici, le fil métallique fait office d'électrode consommable. L'arc électrique est généré entre le fil et la pièce (substrat ou matériau déposé). Cette technique permet un **taux de dépôt élevé**, mais génère une **faible stabilité de l'arc** [11,19,26].
- le *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) correspond au procédé de soudage TIG (*Tungsten Inert Gas*). Ici, l'arc électrique est généré entre une électrode de tungstène non-consommable et la pièce. Le fil est alimenté et fondu dans l'arc électrique généré. Ce procédé permet d'obtenir un **meilleur état de surface**, mais **réduit la vitesse de dépôt** [11,19,26].
- le *Plasma Arc Welding* (PAW), dérivé du GMAW, correspond au procédé de soudage plasma. Une **plus grande quantité d'énergie est générée**, ce qui crée un arc de plasma qui permet de fondre et de déposer le métal [11,19,26].

- le *Cold Metal Transfer* (CMT) est un dérivé du GMAW où une gestion précise du courant et de la tension de création de l'arc électrique est combinée avec un mouvement de va-et-vient du fil. Cette combinaison permet de **réduire l'apport de chaleur** et de générer un **arc plus stable**. Cela permet, de réduire les défauts de fabrication [11,19,25].

Cette technologie a été **commercialisée par Norsk Titanium et Gefertec** [11,26]. Cependant, le WAAM est un procédé flexible et peut être mis en œuvre à partir d'un bras robotisé couplé à un poste de soudage tel que commercialisé par Fronius.

1.1.5. Comparaison des procédés DED

La Table 1.1 synthétise les caractéristiques des procédés DED en vue de leur industrialisation. Les différences de dimension minimale réalisable indiquent la précision de la technologie et la qualité géométrique obtenue (plus elle est faible plus la précision est élevée). Le rendement matière évalue la matière consommée, par rapport à celle constituant la pièce fabriquée. Le DED, et particulièrement les procédés utilisant du fil, permet très peu de perte de matière première. Les taux de déposition varient selon le matériau fabriqué et les paramètres utilisés. Les chiffres présentés donnent une première indication sur les temps de fabrication envisageables, variables selon les procédés. La commercialisation indique si des machines permettant d'utiliser la technologie sont fabriquées et vendues. Des solutions clés en main existent pour le LMD-P et le WAAM.

Table 1.1. Principales caractéristiques industrielles des procédés DED adaptées de [11]

Procédé	Dimension minimale fabricable μm	Rendement matière %	Taux de déposition kg/h	Commercialisation
LMD-P	380 - 1 000	< 90	< 0.5	++
LMD-W	> 4 000	\approx 100	0.1 – 3	-
EBAM	400 - 1 700	\approx 100	jusqu'à 19	+
WAAM	1 000-2 000	\approx 100	1 – 4	++

En conséquence, les usages de ces technologies diffèrent. De manière générale, la technologie LMD-P permet la réalisation de pièces de petites dimensions avec un grand degré de détail, quand les technologies à base de fil permettent une fabrication plus rapide, mais moins précise. Mais la **variabilité** observée, due aux **cas d'utilisation** (matériau, géométrie) et au **choix des paramètres de fabrication** indique qu'il est nécessaire d'adapter les technologies selon les besoins. **La réussite de l'intégration industrielle des procédés DED doit prendre en compte ces différences lors de leur sélection et de leur implémentation.**

1.2. État des lieux de l'industrialisation des procédés DED

L'industrialisation des procédés de fabrication est définie comme le développement et l'intégration de ces procédés de manière structurée et efficace, vers une production à grande

échelle [27]. Les procédés de fabrication innovants, offrant de nouvelles possibilités technologiques, sont alors intégrés au cycle de vie de la pièce fabriquée. La Fig. 1.5 présente le cycle de vie d'une pièce fabriquée en DED, depuis les phases d'études et de conceptions jusqu'à la fin de vie du produit [28]. Le processus de fabrication intègre les phases de pré-traitement, de fabrication avec le procédé DED et de post-traitement.

La performance de la pièce produite dépend de chaque étape de son cycle de vie. Pour participer à l'intégration des procédés DED dans ces processus, il est nécessaire de développer une **meilleure compréhension de leur impact sur les performances** de l'ensemble du cycle de vie du produit [4]. En vue de la taille du défi, **nous choisissons de nous concentrer dans ces travaux sur la phase de fabrication, mettant en œuvre le procédé DED.**

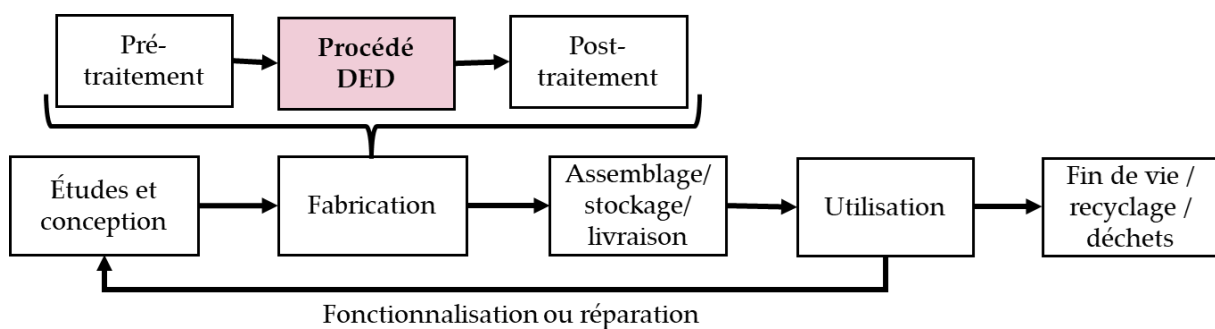


Fig. 1.5. Cycle de vie de pièces fabriquées par DED

1.2.1. Maîtrise des performances des procédés DED

La maîtrise de la performance, prérequis à l'industrialisation

La réussite de l'industrialisation d'un procédé peut être mesurée par un gain dans l'équilibre de trois aspects fondamentaux de la performance pour les entreprises manufacturières : le triangle qualité - coût - délai. L'intérêt d'introduire un nouveau procédé réside en partie sur sa capacité a minima à réduire les coûts, les délais, ou à améliorer la qualité (il a été montré que ces trois aspects ne sont pas nécessairement contradictoires) [29,30].

Ainsi, la phase d'industrialisation d'un procédé vise à développer la maîtrise des coûts, de la qualité et des délais. Cela permet d'assurer l'implémentation d'une technologie fiable, en garantissant l'équilibre de ce triangle [31].

Les procédés DED sont de nouvelles technologies complexes qui ne sont pas encore totalement maîtrisées. Les pièces industrielles fabriquées sont développées au cas par cas : une qualification est obtenue pour une technologie, pour un matériau, pour une géométrie. Ce sont donc les produits qui sont industrialisés, et non le procédé en lui-même. Ces qualifications requièrent de grands efforts de développement. Ainsi, **l'intégration des procédés DED apparaît complexe et peu profitable à court terme, pour les industriels**, vis-à-vis d'autres procédés de fabrication. La maîtrise des performances de ces procédés est donc nécessaire.

Les performances d'un procédé de fabrication

La performance d'un procédé de fabrication doit être évaluée selon les objectifs de fabrication [32]. Ces performances dépendent notamment de la stratégie de fabrication. Il a été identifié que le développement d'outils et de modèles capables d'identifier la stratégie de fabrication appropriée permet d'optimiser le coût global tout en conservant le même niveau de qualité [33].

Neely *et al.* [34] ont défini la mesure de la performance comme un ensemble de critères permettant de quantifier l'efficacité et l'efficacé d'une action. L'efficacité d'un système de production décrit la mesure dans laquelle le système répond aux objectifs (exigences du client), tandis que l'efficacé décrit la juste utilisation des ressources pour satisfaire ces exigences [35]. Pour cela, de nombreux indicateurs de performance ont été développés pour les systèmes de production. Ils se rapportent généralement aux catégories suivantes : coût, productivité, qualité, flexibilité et temps [30,36,37]. Ces catégories intègrent le triangle qualité - coût - délai.

Ces catégories ne sont pas suffisantes en vue du contexte. Comme discuté par plusieurs auteurs [4,38], **la performance d'un système de production repose sur sa capacité à être durable** et doit prendre en compte l'impact du système sur les **dimensions économiques, environnementales et sociales**.

Manco *et al.* [39] soulignent l'importance de considérer ces aspects en amont de l'industrialisation des procédés DED. De plus, **l'optimisation des procédés de fabrication** a été spécifiquement mise en évidence comme un **enjeu pour la durabilité** de la FAM [2]. Pour réussir l'intégration de ces technologies dans les lignes de production, leurs impacts doivent être maîtrisés [40]. En effet, comme le soulignent Ford et Despeisse [2], un procédé de FAM qui n'est pas maîtrisé cause une instabilité des performances du produit, ce qui ne permet pas, de fait, d'utiliser ce procédé pour produire de manière industrielle.

La durabilité des procédés DED est un donc enjeu majeur de leur intégration industrielle. Il est important pour les industriels que leur intégration soit avantageuse économiquement tout en garantissant leur qualité. De plus, les dimensions environnementales et sociales liées à cette intégration ne doivent plus être négligées aujourd'hui.

Ainsi, la **maîtrise des performances des procédés DED** doit prendre en compte à la fois la **qualité de la pièce fabriquée**, et les **performances du procédé de fabrication**, auxquelles on référera par la suite comme les **performances mécaniques et les performances industrielles durables**.

Quels leviers pour la maîtrise des performances ?

De nombreuses études se sont penchées sur la mesure des performances des procédés DED. La consommation d'énergie, de matériaux et de consommables a été étudiée. Les propriétés mécaniques des pièces fabriquées, leur état de surface et leur précision géométrique ont

également fait l'objet d'études récentes. Cependant il apparaît que peu d'études ont considéré **les relations parfois antagonistes entre les performances industrielles durables et les performances mécaniques**, comme le soulignent Peng *et al.* [4], dans leur état de l'art sur la durabilité des procédés de FAM.

La maîtrise des performances des procédés de FAM, dans la phase de fabrication, implique la maîtrise du procédé notamment au travers de la **gestion des paramètres de fabrication**. En effet, une bonne définition des paramètres de fabrication permet d'éviter l'apparition de défauts, d'assurer la qualité des pièces fabriquées et d'assurer la stabilité du processus de fabrication [25]. Pour les procédés PBF, il a été montré que l'optimisation des paramètres de fabrication impacte à la fois la géométrie des pièces, mais aussi les temps de production, la consommation d'énergie et de matière première ; ces différents critères étant liés entre eux dans une certaine mesure [8]. Pour les procédés DED, ces relations ne sont que peu caractérisées. Or, ils peuvent être un levier nécessaire pour contribuer à leur intégration industrielle.

1.2.2. Choix des paramètres de fabrication pour les procédés DED

Aujourd'hui, le choix des paramètres de fabrication pour les procédés DED est réalisé par l'ingénieur procédé. Ces paramètres sont choisis selon son expertise métier et les recommandations du fournisseur de la technologie en fonction de la géométrie et du matériau de la pièce fabriquée afin d'assurer sa fabricabilité, sans tenir compte des performances mécaniques et industrielles durables. Ainsi, pour contribuer à l'industrialisation, grâce à la maîtrise des performances des procédés DED, **le développement de méthodologies permettant de guider le choix des paramètres procédés est essentiel**. Pour les développer, il est nécessaire de modéliser les relations entre les paramètres de fabrication et les performances [41].

L'identification, le contrôle et l'optimisation des paramètres de fabrication, en fonction des performances, ont fait l'objet de recherches récentes pour les procédés DED. Cazaubon *et al.* [42] ont étudié l'influence des paramètres d'entrée du procédé LMD-W sur la géométrie des cordons. Dans une première étude, les auteurs ont conclu à la prévalence de la vitesse du robot et de la vitesse d'avance de fil. Puis, un modèle prédictif de la géométrie des cordons selon les paramètres de premier ordre a été développé [43]. Milhomme [44] a étudié l'influence des paramètres de fabrication du procédé LMD-P sur les propriétés mécaniques du matériau fabriqué. Un modèle prédictif de la géométrie des cordons en fonction des paramètres et stratégies de fabrication a aussi été développé à la suite de ces premiers travaux [45].

Peu d'études ont développé des modèles permettant de prédire l'influence des paramètres de fabrication du DED sur les performances, pour la fabrication de pièces réelles. Les modèles actuels se concentrent souvent sur la fabrication de cordons ou de pièces fines, de type monocordon. De plus, ces modèles ne prennent pas en compte simultanément les performances mécaniques et les performances industrielles durables.

La modélisation de l'impact des paramètres de fabrication sur les performances du procédé est spécifique à chaque procédé et à chaque matériau [46]. Le développement de ces modèles est freiné par la **pluralité des technologies et des matériaux pour le DED**.

Cela fait écho à la difficulté de sélection d'un procédé DED, dû à ces variétés technologiques. Ainsi, **la sélection d'un procédé DED apparaît comme un problème complexe**, pour son intégration dans une chaîne de production industrielle, et dans notre cas pour développer un modèle de performances. En effet, les différents procédés DED présentent **différents niveaux de maturité industrielle** et de complexité de mise en œuvre. Dans la prochaine section, les outils et méthodes de choix des technologies DED, élargi au choix d'un procédé de FAM, sont étudiés.

1.2.3. Sélection d'un procédé DED

Le choix d'une technologie de FAM, souvent associée à un matériau donné, est une problématique qu'ont cherché à adresser de nombreux travaux de recherche ces dernières années.

Manco *et al.* [39] ont analysé les modèles de sélection de technologie de FAM proposés dans la littérature : ils observent que la plupart des modèles développés s'appuient sur le **coût de production** pour choisir une technologie. Pour exemple, Baumers *et al.* [47] ont comparé les coûts de production par pièce (ensembles de turbines) des technologies PBF. Leur modèle de coût a permis d'identifier que la productivité de la machine est le facteur le plus important. Par ailleurs, Achillas *et al.* [48] ont utilisé le coût de production et le temps de production pour choisir une technologie de fabrication de moules d'injection. Ils ont comparé les données pour trois technologies (*fused deposition modelling* (FDM) | *stereolithography* | *selective laser sintering*) pour quatre pièces différentes. La technologie sélectionnée selon ces critères est celle dont le coût du matériau d'apport est le plus faible.

D'autres auteurs ont basé le choix d'une technologie de FAM sur d'autres critères. Fera *et al.* [49] ont développé un **indice de complexité des pièces** à fabriquer, selon leur géométrie, leur nombre, leur variété, et les spécificités de la technologie de fabrication utilisée. En effet, les auteurs considèrent que **le coût de production seul peut amener au mauvais choix de technologie** si l'on ne prend pas en compte les possibilités de réalisation de géométries variées offertes par les différentes technologies. Watson *et al.* [50] ont privilégié la **consommation énergétique** comme facteur de choix. L'efficacité énergétique (énergie électrique par unité de matière fabriquée) permet de comparer deux technologies entre elles, mais d'autres facteurs sont à prendre en compte (par exemple, la complexité géométrique, les spécifications matériau ou le temps de fabrication).

Enfin, des méthodes d'aide à la décision comme l'*Analytic Hierarchy Process* (AHP) ont été exploitées pour classer les meilleures machines pour la fabrication d'une pièce donnée. Mançaneres *et al.* [51] ont utilisé l'AHP en prenant en compte les critères suivants : **temps de production**, la **qualité de surface obtenue**, la **précision**, le **coût de fabrication**, les

opérations de post-traitement nécessaires, la résistance au choc et la résistance en flexion du matériau fabriqué. Dans un premier temps, les critères sont pondérés selon la pièce à fabriquer puis les machines sont comparées entre elles selon ces critères. Cette méthode est efficace pour le choix d'une machine de FAM, mais limitée à une pièce donnée. Zaman *et al.* [52] ont développé un modèle d'aide à la décision, également basé sur l'AHP, permettant la sélection d'un matériau, d'une technologie, et d'une machine de FAM pour un cas d'utilisation donné. Ce modèle intègre plusieurs dimensions à l'échelle du matériau et à l'échelle du procédé de FAM. Pour le matériau, ses **caractéristiques mécaniques**, son **coût d'achat** et son **impact environnemental** sont considérés. Pour la machine, sa **précision**, les **dimensions de fabrication**, la **complexité géométrique réalisable**, sa **productivité** et son **coût d'utilisation** sont pris en compte. Les auteurs l'ont appliqué à la fabrication additive d'une grille de forage utilisée dans l'industrie aéronautique. Les résultats ont prouvé l'efficacité de la méthode utilisée. Ce modèle très complet nécessite une phase importante de collecte de données en amont de chaque utilisation.

Ces travaux offrent des outils de sélection d'une technologie de FAM à condition de connaître les spécifications précises de la pièce à fabriquer, c'est-à-dire le « cas d'utilisation » à mettre en œuvre. Notre approche est différente : elle vise à **sélectionner un procédé DED pour contribuer à son intégration industrielle**. L'intégration d'une technologie dans une ligne de production adresse la fabrication de types de pièces variés, donc de plusieurs cas d'utilisation potentiels. Comment choisir alors un procédé DED, pour garantir son intégration industrielle ?

Les différents niveaux d'intégration et d'utilisation des procédés de FAM dans l'industrie peuvent notamment s'expliquer par leurs **niveaux de maturité industrielle variés**. **Le concept de maturité permet d'illustrer et de quantifier les progrès d'une organisation ou d'un système industriel selon un ensemble de dimensions ayant trait à ses fonctions économiques et opérationnelles** [53]. Une technologie immature favorise une atteinte des performances incertaine, ce qui freine son adoption dans l'industrie [2]. Ainsi, il apparaît **qu'un procédé plus mature**, et donc plus proche de l'industrialisation, **serait une meilleure base pour notre étude**.

1.3. Problématique, méthodologie et plan du manuscrit

Considérer à la fois les performances mécaniques et industrielles durables du procédé est primordiale pour l'industrialisation des procédés DED. Lors de l'étape de fabrication, la maîtrise de ces performances passe par le choix des paramètres de fabrication permettant d'obtenir les performances optimales.

Ce choix est rendu difficile aujourd'hui pour plusieurs raisons :

- un manque de modèle permettant de prédire à la fois les performances mécaniques et industrielles durables en fonction des paramètres de fabrication ;

- la complexité d'élaboration d'un modèle de performances, au vu de la multitude des procédés DED, et de l'hétérogénéité des paramètres d'un procédé à un autre ;
- le choix des paramètres à partir d'un modèle permettant de prédire les performances, celles-ci pouvant être antagonistes.

Ainsi, pour contribuer à l'industrialisation des procédés DED en assurant l'atteinte des performances ciblées, nous proposons dans ces travaux d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche suivante :

QR : Comment choisir les paramètres de fabrication adaptés aux critères de performances mécaniques et industrielles durables pour les procédés DED ?

Pour y répondre, nous proposons le développement d'un modèle d'aide au choix des paramètres selon les performances ciblées. Pour cela, trois étapes sont identifiées et regroupées sous forme d'un cadre méthodologique outillé, représenté en Fig. 1.6., qui a pour but de contribuer à l'industrialisation des procédés DED.

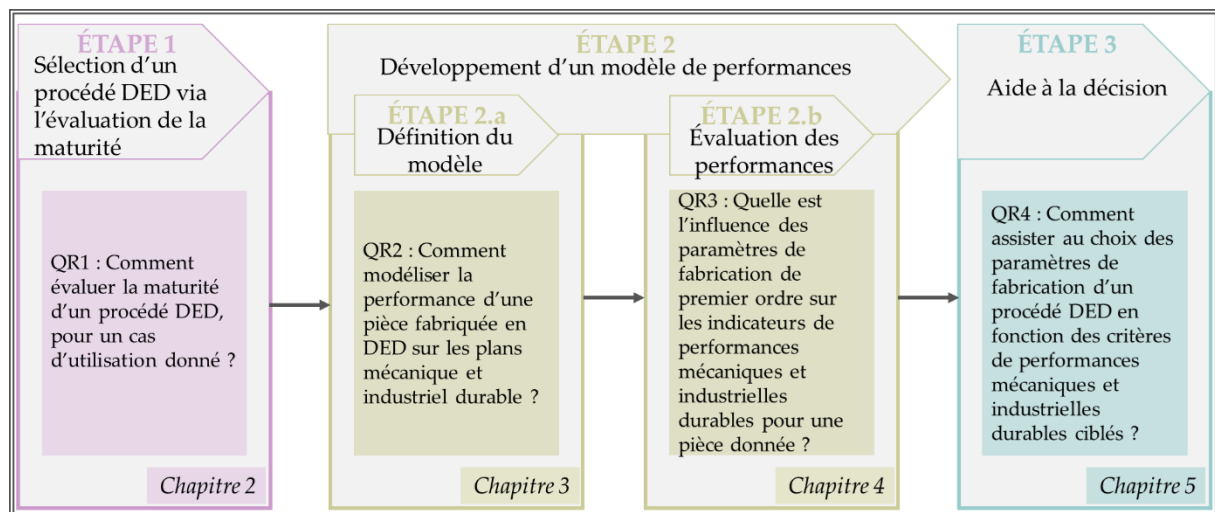


Fig. 1.6. Cadre méthodologique outillé envisagé pour résoudre la problématique

Les trois étapes développées ont pour objectif de répondre à notre question de recherche, tout en adressant les verrous identifiés dans ce chapitre.

La première étape est la sélection d'un procédé DED. Pour cela, nous proposons de prendre en compte la maturité industrielle. Ainsi, notre première sous-question de recherche est la suivante :

QR 1 : Comment évaluer la maturité d'un procédé de DED, pour un cas d'utilisation donné ?

Pour y répondre, le chapitre 2 traite du développement et de l'application d'un modèle d'évaluation de la maturité. Cela nous permet de choisir le procédé le plus mature sur lequel s'appuyer pour la suite de nos travaux.

La deuxième étape est le développement d'un modèle prédictif des performances du procédé choisi. Cette étape est décomposée en deux sous-parties. L'étape 2.a est la définition du modèle afin de répondre à notre deuxième sous-question de recherche :

QR 2 : Comment modéliser la performance d'une pièce fabriquée en DED sur les plans mécanique et industriel durable ?

Pour y répondre le chapitre 3 traite du développement d'un modèle prédictif des performances du procédé en fonction des paramètres de fabrication. Les performances sont définies et les méthodes de modélisation des critères de performances mécaniques et industrielles durables y sont développées. De plus, la forme du modèle et la méthodologie de développement sont détaillées.

L'étape 2.b est l'application du modèle à notre cas d'application afin de répondre à notre troisième sous-question de recherche :

QR 3 : Quelle est l'influence des paramètres de fabrication de premier ordre sur les indicateurs de performances mécaniques et industrielles durables pour une pièce donnée ?

Le chapitre 4 y répond en appliquant les méthodes définies à l'étape précédente à la fabrication d'une pièce représentative d'une pièce industrielle (cf. section 1.4.5). Ainsi, un ensemble de combinaisons paramétriques associées à leurs performances mécaniques et industrielles durables sont obtenues pour notre étude.

Enfin, la troisième étape est le choix des paramètres de fabrication pour atteindre les performances souhaitées. Cette étape permet d'adresser la quatrième sous-question de recherche :

QR 4 : Comment assister le choix des paramètres de fabrication d'un procédé DED en fonction des critères de performances mécaniques et industrielles durables ciblés ?

Le chapitre 5 présente le développement d'un modèle d'aide à la décision permettant d'assister au choix de la meilleure combinaison de paramètres de fabrication selon les performances ciblées. Ce modèle est ensuite appliqué au cas d'étude.

1.4. Application pour le choix des paramètres du procédé WAAM-CMT

Dans nos travaux, le cadre méthodologique outillé envisagé pour contribuer à l'industrialisation des procédés DED est appliqué à la fabrication d'une pièce par le procédé WAAM-CMT. Le choix de cette technologie est guidé par l'évaluation de la maturité développée au Chapitre 2. Ce procédé et ses paramètres de fabrication sont présentés ici.

1.4.1. Fonctionnement du procédé

Comme expliqué en section 1.1.4, le CMT est une variante du WAAM sur le principe du soudage MIG. Il est souvent mis en œuvre en associant un robot industriel à un poste de soudage, ce qui lui confère une grande flexibilité.

Pour diminuer l'apport de chaleur du WAAM, Fronius International GmbH a développé le CMT. Un mouvement de va-et-vient du fil métallique est généré pendant la déposition à l'aide d'un système électromécanique [19]. Un phénomène de court-circuit est ainsi provoqué pour réduire l'énergie apportée au soudage [54].

Bourlet [26] détaille le fonctionnement d'un cycle comme suit à l'aide de la Fig. 1.7 :

- Phase d'amplification : le fil est rétracté, la tension et le courant augmentent, l'arc électrique est créé.
- Phase d'attente : le fil est amené au bain de fusion. L'arc électrique fait fondre le fil et une goutte de métal fondu se forme. La tension et le courant diminuent progressivement.
- Phase de dépôt : la phase de court-circuit commence. L'arc s'éteint et la gouttelette se dépose légèrement dans le bain de fusion. La vitesse d'avance du fil diminue.
- Phase de détachement : une fois la goutte déposée, le fil remonte. La gouttelette se détache et un nouveau cycle peut commencer avec la création de l'arc.

Grâce aux phases de court-circuit, le courant peut être maintenu à un niveau très bas pendant plus longtemps, ce qui réduit considérablement l'apport de chaleur à la pièce [55]. Ce procédé se caractérise donc par un faible apport de chaleur et une vitesse de fabrication élevée [56]. En outre, le CMT diminue l'instabilité de l'arc et la formation de projections [57]. Le CMT est donc une version améliorée du WAAM [57], particulièrement indiquée pour la fabrication de pièces de grandes dimensions en matériau à haute valeur ajoutée, comme l'acier inoxydable 316L [11].

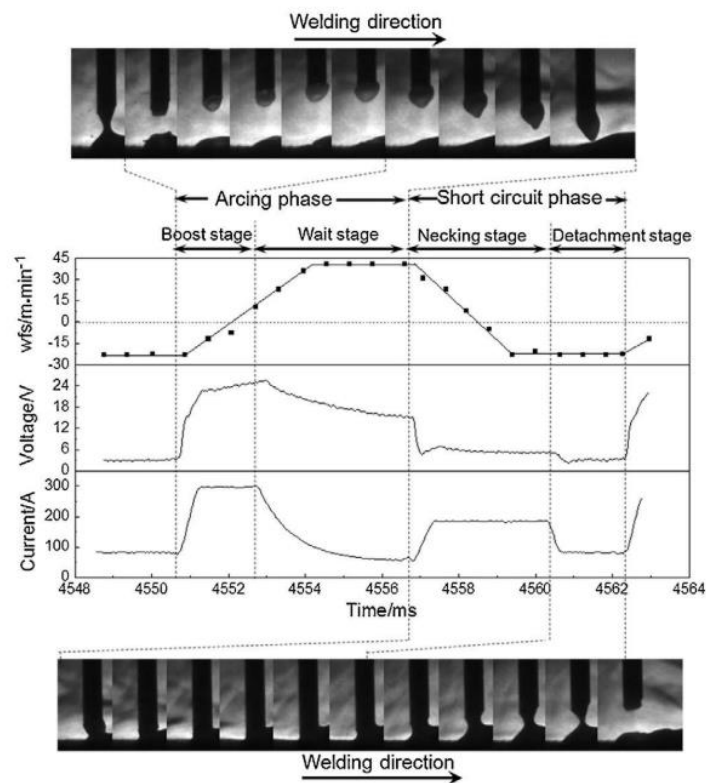
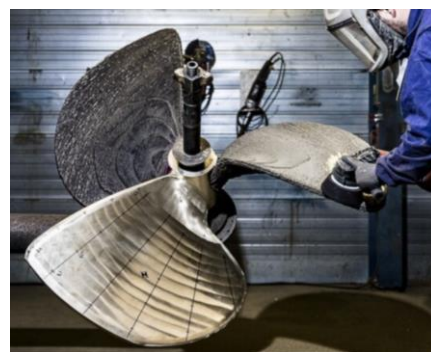


Fig. 1.7. Cycle du CMT d'après Bourlet [26]

Les industries intéressées par l'utilisation de cette technologie appartiennent principalement aux domaines des transports (aérospatiale, automobile, marine et ferroviaire), du nucléaire, de la défense et de l'outillage industriel (moules) [11,19,58]. Parmi les pièces industrielles fabriquées en CMT, un pont piéton en acier inoxydable² (Fig. 1.8.a) fabriqué par l'entreprise MX3D [55] et une hélice de bateau³ (Fig. 1.8.b) construite par RAMLAB [11,26] figurent parmi les plus notables.



(a)



(b)

Fig. 1.8. Pièces industrielles fabriquées en WAAM-CMT : (a) pont fabriqué par MX3D et (b) hélice de bateau fabriquée par RAMLAB

² L'image provient de ce [lien](https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/) : <https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/>

³ L'image originale est accessible à ce [lien](https://www.ramlab.com/resources/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/) : <https://www.ramlab.com/resources/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/>

Pour la recherche, différentes réalisations ont mis en évidence la faisabilité de pièces de formes et de matériaux variés telles qu'une nervure d'aile de 2,5 m en alliage d'aluminium, un modèle d'aile d'avion (0,8 m) en acier à haute résistance pour des essais en soufflerie (Fig. 1.9.a), ou encore un cône profilé en acier doux (0,4 m) (Fig. 1.9.b) [23].



Fig. 1.9. Pièces fabriquées dans le cadre des travaux de recherche de Williams [23] : (a) modèle d'aile d'avion pour soufflerie et (b) cône profilé

1.4.2. Paramètres de fabrication

Les différentes stratégies et paramètres de fabrication du WAAM peuvent être classés en plusieurs catégories.

- 1) La première concerne les **caractéristiques du matériau d'apport**, comprenant le fil et le substrat. La **nuance de matériau** utilisé, le **diamètre du fil** et l'**épaisseur du substrat** impactent notamment la conductivité thermique et donc les propriétés de la pièce fabriquée [59].
- 2) La deuxième catégorie rassemble les **paramètres liés à la machine CMT**. La **vitesse de déplacement de la torche**, TS (pour *Torch Speed*), est la vitesse de mouvement du robot. La **vitesse d'alimentation du fil**, WFS (pour *Wire Feed Speed*), est la vitesse à laquelle le fil sort de la torche. WFS est liée, selon la loi synergique définie, à la tension U et au courant I . Comme pour le soudage, la puissance de l'arc P est fonction de U et I d'après l'équation 1.1 [11,60].

$$P = U \times I \quad (1.1)$$

L'**apport d'énergie** ou apport de chaleur est un facteur important du procédé WAAM comme le soulignent des études récentes [54,61]. Pour le procédé CMT, l'apport d'énergie e_i , exprimé en kJ, caractérise l'énergie apportée à la pièce fabriquée [55,62] et est déterminé selon l'équation 1.2 :

$$e_i = \eta \times \frac{U \times I}{TS} \quad (1.2)$$

Ici, η est le coefficient d'efficacité énergétique. Pour le WAAM CMT, il vaut 80% [63,64].

Un apport d'énergie insuffisant entraîne une fusion incomplète des couches, ce qui est l'un des facteurs conduisant à la formation de porosités [65]. Au contraire, un apport d'énergie élevé peut conduire à un bain de fusion instable et à une mauvaise précision géométrique de la pièce fabriquée. [66]. De plus, e_i influence directement l'histoire thermique du matériau fabriqué dictant ainsi ses caractéristiques microstructurales et donc ses propriétés mécaniques. En particulier, il a été rapporté dans la littérature que le manque de contrôle des paramètres du processus CMT entraîne une détérioration des performances mécaniques et de la précision géométrique en raison d'une accumulation excessive de chaleur [60].

- 3) La troisième catégorie est relative au gaz de protection. Le **gaz de protection utilisé** et son **débit** impactent la formation du bain de fusion et permettent d'éviter l'oxydation du métal [19,57].
- 4) La quatrième catégorie comprend les **paramètres liés à la stratégie de fabrication**. Elle regroupe les paramètres définissant la **trajectoire de l'outil** pour fabriquer la pièce selon ses dimensions. La **distance de travail**, ou *stick out*, représente la distance entre la buse de la torche et la pièce. Les principales trajectoires de fabrication de géométries simples en WAAM sont présentées dans la Fig. 1.10.

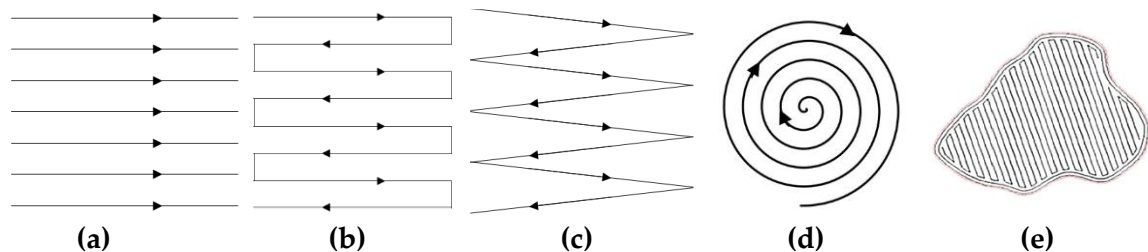


Fig. 1.10. Trajectoires de fabrication pour le WAAM d'après Singh [62] et Aldalur *et al.* [67] : (a) Trajectoire linéaire (b) Trajectoire zigzag (c) Trajectoire oscillatoire (d) Trajectoire spirale (e) Trajectoire hybride

Pour la fabrication de pièces épaisses, la trajectoire en zigzag est recommandée en raison de la productivité du processus et de la qualité de la pièce produite [68,69]. En effet, la trajectoire influe sur le temps de fabrication de chaque couche et l'état de surface de la pièce. Une étude récente [67] présente une nouvelle trajectoire, la **trajectoire triangulaire ou oscillatoire**. Par rapport à la trajectoire d'outil linéaire, pour une paroi épaisse, la trajectoire oscillatoire a montré de meilleures performances en termes de planéité de la surface, de précision géométrique de la pièce, et de temps de fabrication. Peu d'influence a été relevée concernant les propriétés mécaniques et microstructurales. Pour chaque trajectoire, les dimensions de la trajectoire sont les paramètres à déterminer. Pour les trajectoires en zigzag et triangulaire, leur amplitude et leur période sont des paramètres importants. La période est définie selon le taux de chevauchement qui détermine la distance entre deux cordons déposés côte à côte. Ce

paramètre impacte à la fois la planéité, la précision géométrique et le taux de porosités des pièces fabriquées [70,71]. Il influe donc sur les performances mécaniques de la pièce fabriquée.

- 5) Enfin, une cinquième catégorie comprend les **paramètres liés au processus de fabrication couche après couche**. La **hauteur de couche** et le **nombre de couches** sont des paramètres déterminants selon la géométrie fabriquée. Le **temps inter-couche**, qui définit le temps de repos entre chaque couche, et la **température inter-couche**, qui définit la température minimale à atteindre avant de déposer une nouvelle couche, sont liés. Ces paramètres influent sur la productivité et sur la qualité de la pièce fabriquée.

Pour le procédé CMT, on relève donc une dizaine de paramètres de fabrication, souvent interconnectés entre eux, qui influencent les performances mécaniques et industrielles durables directement ou indirectement. Pour maîtriser ces performances, la modélisation de l'impact de ces paramètres est étudiée.

1.4.3. Paramétrage du procédé WAAM-CMT

Différentes études montrent que les divers paramètres du procédé ont des impacts complexes [72,73]. Les phénomènes affectés par ces paramètres tels que la formation de l'arc électrique [72], le refroidissement inter-couche [60,74], le mode de transfert métallique [75–77] ont été étudiés. Ces études ont permis d'identifier que les paramètres les plus importants lors de la création de ces phénomènes sont WFS, TS et le temps de refroidissement inter-couche. La plupart des recherches existantes sont expérimentales et se concentrent sur la modélisation et la simulation du procédé afin de comprendre les phénomènes physiques qui influent sur la géométrie ou les caractéristiques des pièces fabriquées, notamment le transfert de chaleur et le rayonnement, la transformation des matériaux, l'évolution du bain de fusion et leurs effets sur la qualité des pièces.

Yehorov *et al.* [78] ont étudié les effets des paramètres du WAAM sur la qualité des pièces produites. Leurs travaux ont montré que la variation de TS et WFS permet de modifier significativement l'état de surface et la géométrie d'un mur monocordon. Bourlet *et al.* [25] ont analysé les variations des caractéristiques mécaniques de murs en acier en fonction des paramètres du procédé. Ils ont conclu que la dureté et les propriétés de traction ne sont pas influencées par la température d'inter-couche. Cunningham *et al.* [79] ont analysé l'impact de l'apport d'énergie sur les propriétés de traction de murs monocordons. L'influence de l'apport d'énergie sur ces propriétés a été mise en avant.

Cependant, ces travaux ne s'étendent pas à l'optimisation des paramètres étudiés. De plus, ils sont souvent concentrés sur l'étude de cordons unitaires et non sur des géométries représentatives de pièces industrielles réelles. Certains travaux récents se sont penchés sur l'optimisation des paramètres de fabrication au regard des performances mécaniques du cordon seul [80]. Xia *et al.* [81] ont développé un modèle de prédiction de la rugosité obtenue

selon WFS, TS et le taux de chevauchement. Ce modèle a été validé et sa précision a été démontrée.

De plus, pour les performances industrielles durables, plusieurs travaux ont mesuré la productivité, le coût de fabrication et l'impact environnemental du WAAM pour le comparer à d'autres procédés DED [82,83]. Cependant, pour le WAAM, **peu d'études cherchent à évaluer la variation de ces performances en fonction des paramètres de fabrication.**

Ainsi, la littérature scientifique n'apporte pas de modèle permettant de choisir les paramètres de fabrication du WAAM selon les performances mécaniques et industrielles durables ciblées. Il a été souligné que **l'optimisation de paramètres de fabrication du WAAM pour des pièces épaisses est encore peu étudiée** [11,19].

1.4.4. Avis des experts

Afin de déterminer comment le procédé WAAM-CMT est paramétré par les ingénieurs procédés, des entretiens ont été menés. Deux ingénieurs de recherche travaillant avec la technologie CMT sur différentes plateformes de recherche universitaires ont été interrogés pendant un entretien d'une heure selon la trame fournie en Annexe 1.A. Ces ingénieurs sont impliqués dans divers projets d'application industrielle. Les deux entretiens ont permis de concevoir un arbre de décision représentant les étapes suivies pour le paramétrage du procédé à la Fig. 1.11. On constate ainsi qu'une **étude paramétrique est nécessaire** pour caractériser la **géométrie** du cordon et les **caractéristiques mécaniques** du matériau déposé **si le couple matériau et géométrie est fabriqué pour la première fois**. L'étude paramétrique permet de déterminer les paramètres qui assurent la faisabilité de la pièce voulue. Lorsque le matériau et la géométrie sont déjà connus, les paramètres sont appliqués directement. **À aucun moment, les performances ne sont prises en compte pour le choix des paramètres.**

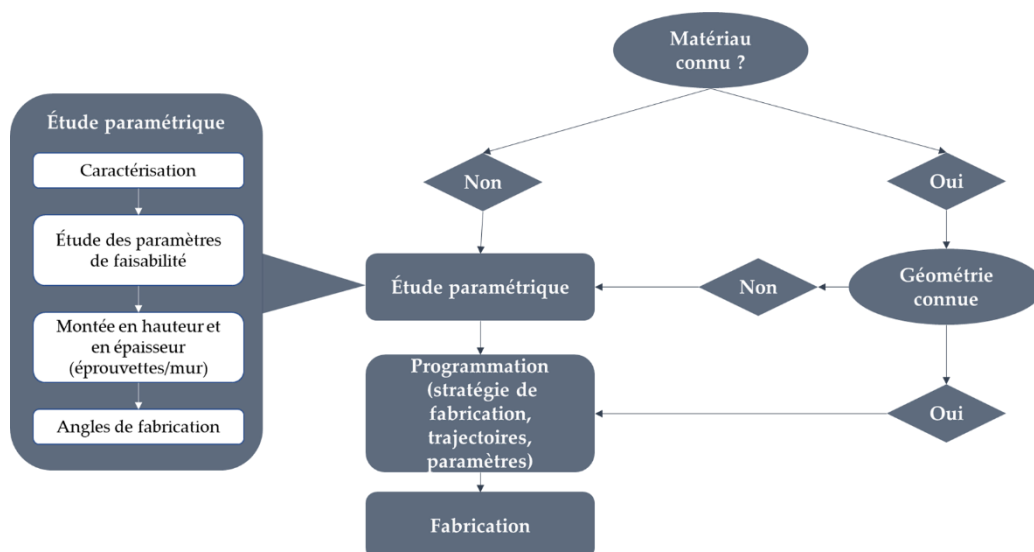


Fig. 1.11. Arbre de décision pour la fabrication d'une pièce en WAAM

1.4.5. Cas d'étude

Nos travaux prennent racine sur un cas d'étude fourni par un industriel⁴. Il s'agit d'une pièce d'outillage de manutention permettant de soulever des charges lourdes. La géométrie de la tête de préhension simplifiée est présentée en Fig. 1.12.a.

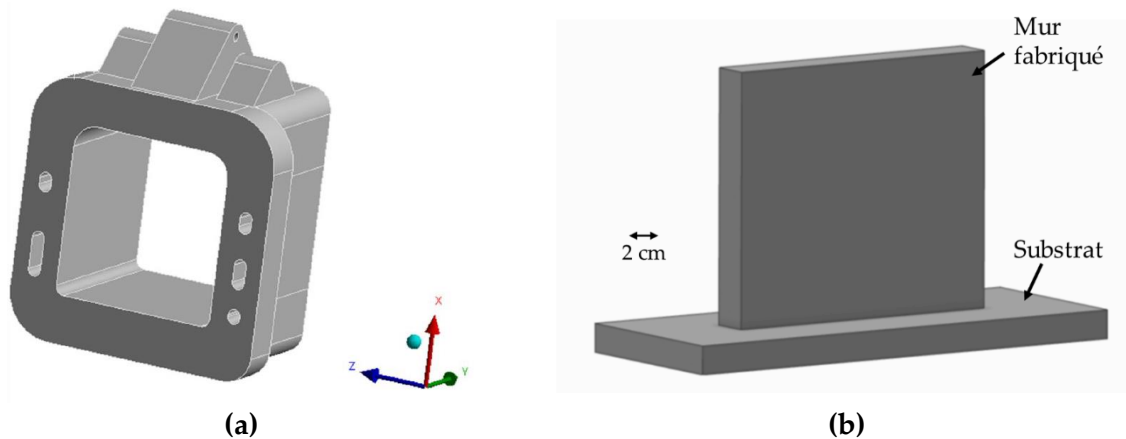


Fig. 1.12. Cas d'étude industriel : (a) géométrie simplifiée de la tête de préhension et (b) mur représentatif d'une géométrie de la pièce industrielle considérée

Dans le cadre de nos travaux, **une paroi représentative de la tête de préhension a été fabriquée** en acier inoxydable 316L. Ses dimensions sont 180 x 160 x 25 x mm. La conception assistée par ordinateur (CAO) du mur étudié est représenté en Fig. 1.12.b.

1.5. Conclusion

Ce chapitre présente le positionnement de nos travaux et notre proposition afin de contribuer à l'industrialisation des procédés DED. En effet, bien qu'ils permettent aujourd'hui la réalisation de pièces industrielles, ces procédés sont encore peu utilisés par les entreprises manufacturières.

Les différents procédés DED et leurs spécificités sont présentés. L'état des lieux de l'intégration industrielle de ces procédés a mis en lumière les difficultés des entreprises manufacturières pour maîtriser les performances associées à ce procédé. L'importance de prendre en considération les performances relatives à la pièce fabriquée ainsi que les performances durables du processus de fabrication est soulignée.

Les performances mécaniques permettent d'assurer que la pièce répond aux spécifications définies dans l'étude de conception telles que la résistance mécanique de la pièce à différentes sollicitations et sa précision dimensionnelle. Les performances industrielles durables évaluent

⁴ Domaine d'expertises : Études et réalisation dans les domaines de la défense, de l'énergie, de l'aéronautique et du médical.

l'impact économique, environnemental et social de la phase de fabrication. Ces critères doivent être cohérents avec la stratégie, le modèle économique et les orientations de l'entreprise.

Ces performances dépendent notamment des paramètres de fabrication du procédé. Or, la sélection de paramètres optimaux pour favoriser l'ensemble des performances n'est pas toujours possible, ni aisée, voire conflictuelle.

Pour répondre à cette problématique et contribuer à l'industrialisation des procédés DED nous envisageons trois étapes regroupées sous la forme d'un cadre méthodologique outillé :

- 1 | La sélection d'un procédé basée sur l'évaluation de la maturité ;
- 2 | La modélisation des performances selon les paramètres de fabrication ;
- 3 | L'aide aux choix des paramètres de fabrication selon les données du modèle de performances ;

Chacune de ces étapes est traitée dans la suite de nos travaux comme présenté en Fig. 1.6. Les modèles développés sont appliqués au cas d'étude choisi selon le procédé sélectionné (WAAM-CMT) grâce à l'évaluation de la maturité.

Pour le WAAM-CMT, le fonctionnement du procédé et ses principaux paramètres ont été introduits. Les points suivants ont été soulignés.

- Les études de caractérisation des paramètres pour la fabrication avec le procédé WAAM-CMT n'ont été menées que sur des cordons ou des murs monocordons, dont la transférabilité à des pièces industrielles est inconnue. Peu d'études sur des pièces épaisses représentatives de la réalité industrielle ont été réalisées.
- Si des études ont permis la modélisation des performances mécaniques ou industrielles durables, aucune étude publiée à ce jour n'a permis la modélisation des deux à la fois pour le WAAM-CMT.
- Le choix des paramètres de fabrication, aujourd'hui, n'est effectué qu'au regard de la fabricabilité.

Nos travaux envisagent le développement d'une méthodologie pour aider au choix des paramètres de fabrication et son application au WAAM-CMT. Ainsi, nous cherchons à contribuer à la fois à l'intégration industrielle des procédés DED et au développement des connaissances du procédé sélectionné.

Le prochain chapitre justifie le choix du WAAM-CMT pour nos travaux, basé sur une étude de la maturité des procédés DED.

Chapitre 2.

Proposition d'un modèle d'évaluation de la maturité des procédés DED

Sommaire

2.1. Méthodologie suivie.....	27
2.2. IDENTIFIER. État de l'art sur l'évaluation de la maturité industrielle.....	28
2.2.1. Le rôle de la maturité industrielle	28
2.2.2. Évaluation de la maturité des procédés de fabrication	30
2.2.3. Évaluation de la maturité des procédés de FA	35
2.2.4. Vers un modèle d'évaluation de la maturité spécifique à la FAM.....	36
2.3. DÉFINIR le périmètre du système étudié.....	36
2.4. CONCEVOIR le modèle.....	38
2.4.1. Développer les critères.....	38
2.4.2. Construire la méthodologie d'évaluation.....	40
2.4.3. Définir la méthode de calcul du score final	42
2.5. APPLIQUER le modèle pour choisir un TUCC.....	43
2.5.1. Application de l'AMRL	43
2.5.2. Sélection d'un TUCC.....	46
2.6. VALIDER le modèle.....	47
2.6.1. Première itération de validation : recueil de l'avis d'experts.....	47
2.6.2. Seconde itération de validation : mesure de la fiabilité des résultats	49
2.6.3. Perspectives d'améliorations du modèle	51
2.7. Conclusion.....	51

Ce chapitre constitue la première étape du cadre de référence envisagé, comme illustré sur la Fig. 2.1. Il s'agit de la sélection d'une technologie DED à partir de laquelle un modèle de performances sera construit pour caractériser l'influence des paramètres de fabrication sur les performances du procédé. Pour choisir ce procédé, nous décidons de nous baser sur leur maturité industrielle. Ainsi, notre première question de recherche développée dans le contexte de notre étude, focalisée sur l'intégration des procédés DED dans l'industrie, est :

QR1 : Comment évaluer la maturité d'un procédé DED, pour un cas d'utilisation donné ?

Pour y répondre, nous proposons : (i) le développement d'un modèle d'évaluation de la maturité et (ii) son application pour le choix de la technologie DED sur laquelle se concentreront nos travaux.

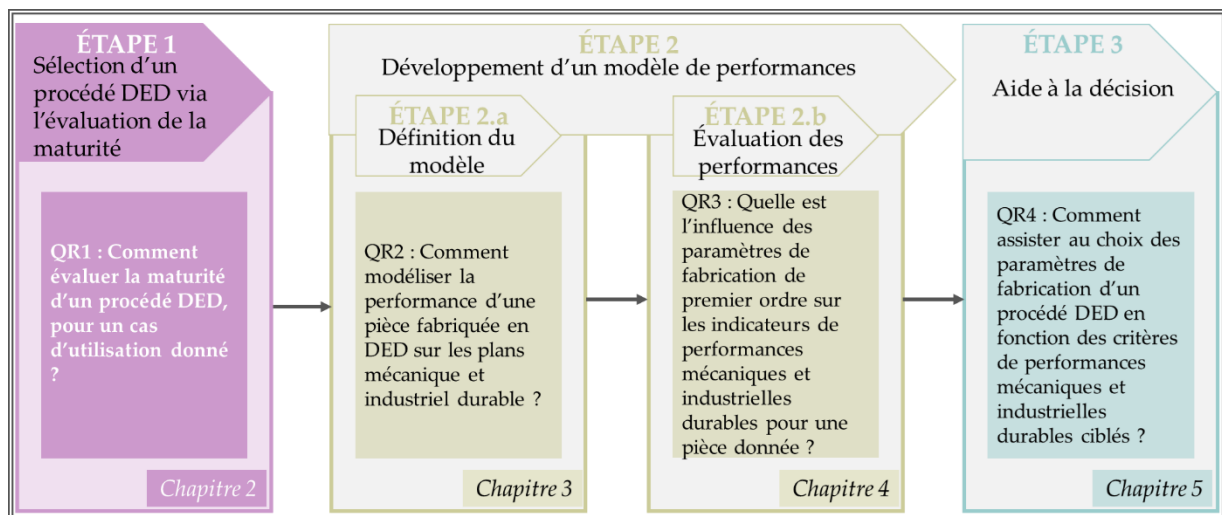


Fig. 2.1 Positionnement du chapitre 2 dans le cadre méthodologique de référence envisagé

2.1. Méthodologie suivie

La démarche de construction de modèles d'évaluation de la maturité a été investiguée par Becker *et al.* [84] pour le développement d'un tel modèle appliqué au domaine informatique. Les principales étapes définies sont (i) l'étude des modèles existants, (ii) la définition de l'objet de l'étude (la stratégie de développement du modèle) (iii) le développement itératif du modèle et (iv) la validation du modèle. Ces étapes se retrouvent dans d'autres travaux de développement de modèles d'évaluation de la maturité [85–87]. L'approche proposée ici suit ces mêmes étapes.

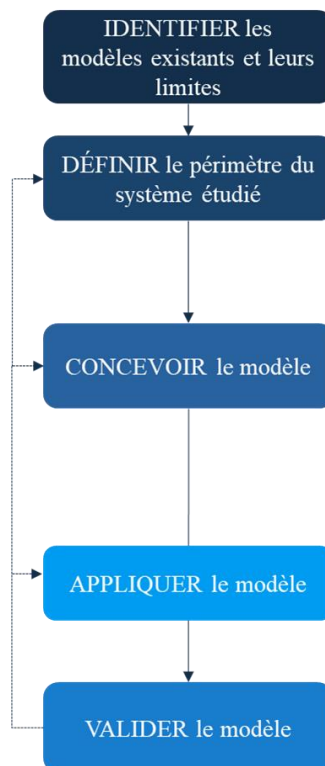


Fig. 2.2. Méthodologie de conception d'un modèle d'évaluation de la maturité spécifique

La Fig. 2.2 détaille cette méthodologie : elle est suivie pas à pas dans la suite de ce chapitre et elle comporte les étapes suivantes.

- L'étape initiale consiste à **IDENTIFIER** les lacunes et les défis dans le domaine de l'évaluation de la maturité pour les processus industriels, en se basant sur **l'état de l'art** (section 2.2).
- La deuxième étape doit **DÉFINIR** le périmètre du système étudié, qui est **l'objet de l'évaluation** de la maturité. Il faut déterminer si le modèle se concentre sur l'évaluation du cycle de vie global du produit fabriqué additivement, ou seulement sur la technologie utilisée lors de la phase de fabrication, ou sur une combinaison spécifique qui pourrait inclure la technologie, le cas d'utilisation, le matériau, et même la géométrie (section 2.3).

- La troisième étape, **CONCEVOIR**, consiste en l'**élaboration** du modèle (section 2.4).
- La quatrième étape consiste à **APPLIQUER** le modèle (section 2.5). Dans notre étude, le modèle est appliqué pour évaluer la maturité dans le cadre du **choix d'une technologie DED**.
- Enfin, l'étape d'échanges avec des experts permet de **VALIDER** le modèle et son application (section 2.6). Des itérations sont réalisées en fonction des **retours des experts** pour améliorer le modèle.

2.2. IDENTIFIER. État de l'art sur l'évaluation de la maturité industrielle

Dans cette section, la maturité industrielle est définie et un état de l'art des outils et méthodes d'évaluation de la maturité des procédés de fabrication est proposé.

2.2.1. Le rôle de la maturité industrielle

Une technologie mature est une technologie comprise et parfaitement **maîtrisée**. Plus une technologie est mature, plus il est certain de pouvoir la mettre en œuvre pour le développement d'un produit [87]. Une technologie immature peut se comporter de manière inattendue. Pour exemple, les batteries lithium-ions, insuffisamment développées, ont causé les explosions de téléphone du fabricant Samsung [88].

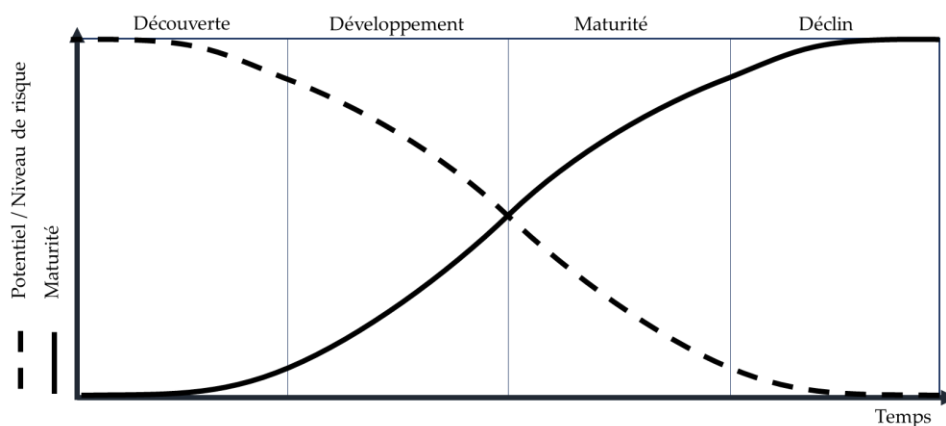


Fig. 2.3. Cycle de vie technologique adapté de [89,90]

L'évolution des technologies suit un cycle de vie, représenté en Fig. 2.3. Le niveau de maturité peut être représenté comme le développement d'une technologie par rapport à ce cycle de vie [90]. Plus une technologie est nouvelle, moins elle est mature et plus son potentiel et les risques associés à son intégration sont élevés. Au fur et à mesure de son développement, la technologie devient plus mature, son potentiel et le niveau de risque associé décroissent. En fin de vie, la technologie atteint le niveau de maturité le plus élevé mais n'a plus de potentiel : elle n'est plus compétitive et sera bientôt remplacée par une nouvelle technologie [87]. **Une technologie**

atteint la maturité lorsqu'elle est intégrable dans un processus industriel de manière à mitiger les risques et en y apportant un fort impact compétitif [89]. Il faut noter que la répartition des quatre phases dans le temps n'est pas égale et est propre à chaque technologie.

D'une part, l'intégration de **technologies peu matures** dans un processus de fabrication peut générer des **risques** tels que des **dépassements de coûts et de délais** ou une **dégradation des performances** du processus et de la qualité du produit [91]. Pour exemple, dans le domaine informatique, il a été caractérisé qu'une amélioration de 1 % de la maturité du processus de développement de logiciel (système algorithmique complexe en Cobol) cause une amélioration de 1,589 % de la qualité du logiciel produit (définie par les auteurs comme le nombre de lignes de code source du produit logiciel divisé par le nombre d'erreurs signalées lors des tests du système et des clients). Et une amélioration de la qualité de 1 % induit une réduction de 0,454 % du temps de production dudit logiciel et une réduction de 0,611 % des efforts de développement nécessaires [92].

D'autre part, l'intégration des technologies ayant une **maturité très avancée** (en déclin) peut être **contre-productive**. En effet, en fonction de la saturation du marché en technologies matures, le potentiel de compétitivité diminue [90]. Mais l'intégration d'une telle technologie peut aussi être perçue comme avantageuse en termes de coûts d'utilisation et de développement.

Dans le contexte actuel de la FAM, il faut noter que le développement de ces technologies vers un degré de maturité important n'est pas toujours linéaire. Une technologie peut être abandonnée avant de revenir au centre des débats pour une autre application pour laquelle les barrières ayant mené à son abandon vaudront la peine d'être levées. Pour exemple, le développement de technologies de FAM à partir de métal liquide a été abandonné dû aux coûts et à la complexité de mise en œuvre comparés aux autres procédés. Malgré les recherches effectuées, cette technologie n'a pas vu le jour commercialement [93]. Cependant, les recherches effectuées sur cette technologie servent aujourd'hui à développer la fabrication additive de microcomposants électroniques à partir de métal liquide [94]. Les prochaines années permettront de voir si cette technologie atteindra la maturité industrielle.

Le niveau de maturité industrielle d'une technologie est donc un élément de décision clé pour son développement et son intégration dans les procédés industriels [95]. Il permet à la fois de déterminer son potentiel d'intégration dans l'industrie et d'identifier les risques et opportunités associés à son industrialisation [96–98]. La maturité technologique peut impacter concrètement les entreprises comme l'ont démontré Lee *et al.* [96] pour la constitution d'une équipe projet : lorsque les équipes travaillent avec des technologies matures, les auteurs recommandent une diversification des lieux de travail et des niveaux d'expérience, mais l'uni-disciplinarité est privilégiée. À l'inverse, lorsqu'un projet innovant vise à appliquer une technologie inconnue et immature, les responsables doivent créer une équipe de projet pluridisciplinaire qui offre un éventail varié de compétences. C'est pourquoi **il est important**

pour une entreprise d'évaluer et de maîtriser le niveau de maturité de ses processus et technologies.

2.2.2. Évaluation de la maturité des procédés de fabrication

Un **modèle d'évaluation de la maturité** peut être défini comme un **ensemble de dimensions permettant de mesurer le niveau de maturité des processus stratégiques et opérationnels d'une organisation** [99].

Technology Readiness Levels (TRL)

La plus connue et la plus utilisée tant dans l'industrie que dans la littérature pour évaluer le niveau de maturité des technologies est l'échelle TRL développée par la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) en 1974 [100,101]. Cette échelle évalue la maturité d'une technologie selon neuf niveaux, comme représentés dans la Table 2.1.

Table 2.1. Échelles TRL et MRL adaptées en français d'après [102]

	TRL	MRL
R&D	1 Principes de base observés et rapportés	1 Principes de base du processus de fabrication identifiés
	2 Concept de la technologie/de son application formulé	2 Concepts de fabrication du système identifiés
	3 Preuve de concept analytique et/ou expérimentale	3 Preuve de concept de la fabrication du système développée
Validation technologique	4 Composants validés en laboratoire	4 Capabilité de produire un prototype des composants du système en laboratoire
	5 Composants validés en environnement approprié	5 Capabilité de produire un prototype des composants du système en environnement semblable à celui de production
	6 Système, sous-système ou prototype validé dans un environnement approprié	6 Capabilité de produire un prototype du système en environnement semblable à celui de production
Mise en œuvre et production	7 Prototype du système validé dans un environnement opérationnel	7 Capabilité de produire le système et ses composants en environnement semblable à celui de production
	8 Système final validé et qualifié après tests et essais	8 Capabilité de la ligne de fabrication pilote démontrée. Prêt à démarrer la production à bas régime
	9 Système final validé après mise en œuvre opérationnelle	9 Capabilité de la ligne de fabrication à bas régime démontrée. Prêt à démarrer la production à plein régime.
		10 Capabilité de la ligne de fabrication à plein régime démontrée. Prêt à démarrer la production à plein régime.

Chaque niveau représente une étape du développement de la technologie depuis les premières étapes de recherche à sa validation au travers d'utilisations réussies dans l'industrie. Le

développement de la technologie, ses lacunes, les risques et le potentiel de la technologie sont évalués au travers du TRL [102]. L'évaluation TRL a été appliquée, par exemple, pour déterminer le niveau d'avancement technologique des implants médicaux tels que les tissus cartilagineux ou les os composites [100]. L'évaluation TRL est aussi utilisée pour guider le choix entre plusieurs alternatives technologiques, comme cela a été réalisé pour le choix de différents sous-systèmes de la fusée Ariane 6 [103].

Cependant, plusieurs limites de l'utilisation des TRL pour mesurer le niveau de maturité des procédés de fabrication ont été révélées.

- Le principal frein est que **la maturité technologique n'est pas suffisante pour évaluer la maturité d'un procédé de fabrication** [104]. En effet, d'autres aspects tels que la disponibilité des matériaux, le développement des processus de fabrication ou la sensibilisation de la main-d'œuvre doivent être pris en compte [22, 25]. La technologie n'est en effet qu'un élément du procédé de fabrication qui met en œuvre cette technologie.
- Il a été souligné, par ailleurs, que les TRL consistent en une **évaluation subjective** basée sur l'interprétation de la définition des niveaux TRL par l'évaluateur [106]. Selon l'évaluateur, l'évaluation peut donc différer pour une même technologie.
- Enfin, le fait que les TRL soient des **nombre ordinaux** peut freiner leur utilisation de manière mathématique et leur intégration dans des formules plus complexes. Des investigations visant à transformer les TRL ordinaux en nombres cardinaux ont été élaborées, mais elles n'ont pas donné lieu à un consensus autour d'une échelle TRL cardinale [107,108].

Ainsi, même si le TRL est l'échelle d'évaluation de la maturité la plus répandue et relativement facile à prendre en main, **elle apparaît limitée pour mesurer la maturité d'un procédé de fabrication dans son ensemble.**

Manufacturing Readiness Levels (MRL)

Le département de la défense des États-Unis (*Department of Defense* - DoD) a développé sa propre échelle, plus complète et spécifique, pour l'évaluation de la maturité de systèmes de production dans le cadre de leurs acquisitions ou de leurs développements. Il s'agit de l'échelle MRL basée sur l'échelle TRL. Cette échelle est composée de dix niveaux, en ligne avec les TRL, comme représentés dans la Table 2.1.

Le principal avantage de l'échelle MRL par rapport à l'échelle TRL est la méthode d'évaluation liée, plus précise car découpée en critères dont la maturité est évaluée indépendamment. De plus, l'évaluation à l'aide de l'échelle MRL permet d'identifier la maturité d'un processus de fabrication pour conduire à l'identification des lacunes, des risques associés, des opportunités

de développement et d'améliorations des performances des technologies et systèmes de production [100,102,109].

Les MRL sont définis selon neuf critères et vingt-trois sous-critères. Chacun des sous-critères est évalué de 1 à 10. Pour certains cas d'applications, des questionnaires permettant de mesurer le niveau de chaque sous-critère ont été élaborés. Les critères sont : la technologie et la base industrielle, la conception, les coûts/le financement, les matériaux, le rendement et le contrôle des processus, la qualité, la main-d'œuvre, les installations et la gestion de production. Il faut noter que les TRL sont un sous-critère des MRL. Le MRL d'un processus ne peut être supérieur au niveau de TRL de la technologie centrale utilisée. **Le MRL final correspond au niveau minimum de maturité affecté à chacun des sous-critères.**

Le principe du MRL a pu être utilisé dans des contextes variés en dehors du DoD. Syamsuddin *et al.* [110] l'ont utilisé pour évaluer la maturité du processus de gestion de la qualité d'une entreprise produisant des lits d'hôpitaux. Wiratmadja et Mufid [111] ont étudié la maturité des processus de fabrication des roues de trains en Indonésie avec la méthode MRL. Cela leur a permis d'identifier les axes d'améliorations pour augmenter la maturité de la chaîne de production. Wu *et al.* [105] ont réalisé un état de l'art de la bio-impression de tissus humains en se basant sur les MRL pour évaluer le niveau de maturité ainsi que les risques et le potentiel associé au développement de cette technologie. Ces études montrent que l'échelle MRL peut être transférée en dehors du contexte du DoD.

Cependant, certaines limites ont été identifiées.

- Comme pour l'échelle TRL, l'évaluation des MRL **nécessite un évaluateur expert** dans le domaine du procédé à évaluer. La subjectivité due à l'évaluateur est ici réduite grâce à l'évaluation détaillée mise en place.
- L'évaluation MRL, qui a été **développée spécifiquement dans le contexte organisationnel du DoD**, évalue la maturité des systèmes de fabrication dans le contexte des procédures en place au DoD (procédures qualité et fournisseurs par exemple). De plus, elle est complexifiée par l'usage de vocabulaire et d'acronymes spécifiques. Un travail d'adaptation est nécessaire pour l'appliquer à d'autres contextes [105].

D'autres modèles moins répandus ont été développés pour s'affranchir des limites évoquées pour les évaluations TRL et MRL.

Méthodes d'évaluation bibliométrique

Afin de s'affranchir du besoin d'être mis en œuvre par des experts, un modèle d'évaluation de la maturité quantitatif BIMATEM a été développé [87]. Ce modèle se base sur l'hypothèse que chaque étape du cycle de vie d'une technologie peut être mise en correspondance avec les données technologiques contenues dans la littérature scientifique, les brevets et les bases de

données. Il permet de calculer le TRL d'une technologie selon les publications et brevets publiés. Cette approche est intéressante, car elle est **quantitative** et **ne requiert pas une évaluation par un expert**.

Une autre méthode, nommée TeknoRoadmap, utilise également la bibliométrie couplée à des outils plus puissants tels que les ontologies et le *web content mining* pour prédire la feuille de route du développement d'une technologie de pointe. Pour cela, la technologie est décomposée en sous-éléments technologiques dont les feuilles de route sont prédites en analysant leur développement passé à l'aide notamment de la bibliométrie. Au travers de ces feuilles de route, les futures activités de recherche permettant le développement de cette technologie sont définies [112]. Ce modèle permet par ailleurs d'obtenir une idée du niveau de maturité de la technologie par rapport aux actions de recherche qui lui sont associées. Des actions de recherche proches de la phase d'état de l'art indiqueront une technologie peu mature alors que des actions telles que la standardisation de protocoles indique une technologie plus mature. Cependant, **aucun indicateur de la maturité n'est défini**.

Ainsi, même si ces approches sont particulièrement intéressantes pour les technologies émergentes très représentées dans la recherche scientifique telle que la FAM, elles paraissent **limitées pour la définition précise d'un niveau de maturité** d'une technologie associée à son utilisation dans un laboratoire de recherche ou une entreprise. En effet, elles considèrent des données publiques à l'échelle globale (articles de journaux, brevets) pour établir le degré de maturité. Ainsi, **des technologies confidentielles ne peuvent pas être évaluées**. De plus, **l'évaluation peut refléter un état de maturité antérieur** dû aux délais de publication parfois longs.

MAMMS

Un autre modèle a été développé pour l'analyse de la **maturité des systèmes de fabrication**, le MAMMS [85]. Ce modèle, construit par consultation d'un large panel d'experts, définit jusqu'à soixante-dix-neuf variables évaluées sur une échelle à cinq niveaux. Ces variables peuvent être liées aux priorités de l'entreprise (comme les coûts, la qualité, la protection de l'environnement ou encore l'esprit d'innovation) ou aux leviers de fabrication (tels que les ressources humaines, la planification de production, les technologies, les usines) ou encore la stratégie de l'entreprise, par exemple. Au travers de la maturité, les forces et faiblesses de l'entreprise sont évaluées par l'ensemble des employés. À partir des évaluations, un classement des variables et une note totale de maturité du système de fabrication sont calculés. Ce modèle est **précis** du fait du grand nombre de critères détaillés. Cependant, les **importants moyens** (temps et experts) à mobiliser pour le mettre en œuvre semblent avoir freiné son adoption et son utilisation.

Integration Readiness Levels (IRL) et Designs Readiness Levels (DRL)

L'échelle IRL a été définie par Sauser *et al.* [113]. Il s'agit d'une échelle parallèle au TRL (de 1 à 9) permettant d'évaluer **la maturité d'une technologie vis-à-vis de son intégration dans un**

système : les interactions entre les différents composants du système sont évaluées pour déterminer le niveau IRL. L'IRL prend en compte un périmètre plus large que le TRL dans son évaluation, mais elle **ne permet pas de prendre en compte des aspects organisationnels** plus large comme les coûts ou le management.

L'échelle DRL est une méthode d'évaluation de la maturité, permettant d'**aider aux choix de conception** (géométries, matériaux, procédé de fabrication) en fonction des options les plus matures. Le DRL évalue un **pourcentage de maturité d'un concept** en fonction des échelles **TRL et IRL**, liées au temps de développement de la technologie [108]. Pour une boîte de vitesse, par exemple, le calcul du DRL permet de comparer un concept réalisé en aluminium moulé ou injecté. Dans le cas d'étude présenté, la solution de conception avec l'aluminium moulé est mature à 89 % alors que l'autre ne l'est qu'à 65 %. Cela est dû principalement au temps estimé de développement de la solution couplé à son TRL et son IRL. Cette méthode est très **complexe** due aux calculs intégrant différentes dimensions comme le temps de développement et la maturité technologique. De plus, **seules les dimensions technologiques sont prises en compte**, sans considérer le coût ou les aspects environnementaux et sociaux.

Autres modèles d'évaluation

Schumacher *et al.* [99] ont développé un modèle permettant d'évaluer la **maturité des entreprises vis-à-vis de l'industrie 4.0**. Ce modèle, basé sur l'évaluation de soixante-deux critères, permet au décideur de les **pondérer**. Il est **clair et conceptuel** basé sur une analyse qualitative et quantitative. Ce modèle a été réalisé spécifiquement pour des entreprises industrielles qui fabriquent elles-mêmes leurs produits (ceux-ci étant des produits physiques), pour un groupe de clients déterminés. Il est donc **difficilement transférable** à des cas différents.

Caiado *et al.* [86] ont proposé un modèle d'évaluation de la maturité appliqué aux **chaînes logistiques d'entreprises manufacturières**, OSCM 4.0. Ce modèle permet d'évaluer le niveau de préparation des entreprises manufacturières pour digitaliser la gestion des chaînes d'approvisionnement et des opérations. Le modèle permet d'évaluer la maturité et de cibler les actions permettant d'augmenter la maturité. Il est basé sur l'utilisation de méthodes probabilistes et de logique floue (aléatoire). Cela permet de se libérer des biais d'évaluation et des incertitudes d'évaluation. Le modèle assigne un niveau de maturité entre 0 (non-existant) et 5 (auto-optimisation) à partir de l'évaluation d'indicateurs répartis selon sept axes : client, logistique, fournisseur, intégration, PPC (production planification et contrôle), qualité et maintenance. Ce modèle est très précis mais **très spécifique au domaine de l'approvisionnement**. Son application à une entreprise brésilienne a permis d'identifier des technologies permettant d'augmenter la maturité de chacun des axes et de développer un plan d'action pour la digitalisation de la gestion de la chaîne d'approvisionnement et des opérations.

2.2.3. Évaluation de la maturité des procédés de FA

Certains des modèles abordés ci-dessus ont été appliqués à la FAM. Lezama-Nicolàs *et al.* [87] ont appliqué BIMATEM à sept technologies de FAM. Leur étude, réalisée en 2018, classe les technologies PBF entre les TRL 6 et 7 et les technologies DED entre les TRL 4 et 5. Cependant, **ces résultats restent vagues**, car ils ne rentrent pas dans le détail des différentes technologies DED et **l'obtention d'un TRL se limite à la maturité technologique sans tenir compte d'autres aspects**.

Par ailleurs, Haug *et al.* [114] ont étudié le lien entre la maturité de la FA dans les entreprises de fabrication, le développement des connaissances au sujet des procédés intégrés, et les résultats de ces entreprises. Cette étude a montré que des entreprises avec un faible niveau de maturité bénéficieront plus de l'apport de connaissances par des consultants et d'autres utilisateurs des mêmes technologies. Pour les entreprises ayant déjà un niveau de maturité élevé en FA elles auront davantage de retombées positives en accumulant des connaissances auprès des fabricants de machines de FA. Pour calculer le niveau de maturité des entreprises, l'outil développé par Schumacher *et al.* [99] a été utilisé. Cette étude ne précise pas le détail des technologies de FA considérées, polymère ou métal.

Dans le contexte de l'industrie 4.0, le manque de modèle d'évaluation de la maturité spécifiquement adapté à la FAM est souligné par plusieurs auteurs [99,115–117]. **L'importance de l'intégration de la dimension de durabilité de la FAM dans l'évaluation de la maturité des procédés** est notamment discutée [118].

Simpson [119] affirme que **le TRL et le MRL en tant que tels ne conviennent pas à l'évaluation de la maturité de la fabrication additive**. En effet, **l'échelle TRL est trop vaste et pas assez précise** alors que **l'échelle MRL bien que plus précise est trop restrictive** de par son développement pour des contextes particuliers. Il propose la création d'un modèle selon quatre critères : les **machines**, les **matériaux**, la **conception** et le **personnel**. Il propose de les évaluer sur cinq niveaux.

Un tel modèle pourrait ensuite être intégré à une démarche d'aide à la sélection d'une technologie de FAM pour une application donnée. Cela a été réalisé dans d'autres contextes. Pour exemple, Shah *et al.* [97] ont développé un outil d'aide à la décision pour choisir un processus de fabrication en fonction de l'évaluation des risques financiers relatifs à l'implémentation du processus pour la fabrication d'un produit défini. Une méthodologie d'évaluation des risques (identification et quantification des facteurs de risque) a été développée et un indicateur global de risque a été défini. Il est utilisé pour classer les procédés de fabrication considérés selon leur désirabilité en utilisant des méthodes d'aides à la décision. Un tel couplage s'est révélé fructueux pour sélectionner un processus de fabrication d'une pièce de centrage de machine-outil.

Afin de franchir les verrous identifiés dans la littérature pour pouvoir évaluer la maturité d'un procédé de FAM, il semble donc nécessaire de développer un nouveau modèle d'évaluation de la maturité adapté au contexte de la FAM, comme le soulignent plusieurs auteurs [104,107]. En effet, les modèles d'évaluation de la maturité pour les processus de fabrication ont été développés de manière spécifique à leurs contextes d'applications [85,108] et sont donc difficilement adaptables à la FAM.

2.2.4. Vers un modèle d'évaluation de la maturité spécifique à la FAM

L'état de l'art a permis de mettre en évidence les constats suivants :

- il n'existe pas de modèle de **sélection d'un procédé de FAM** centré sur l'**évaluation de la maturité** ;
- le **niveau de maturité** d'un processus de fabrication est un **élément clé** pour réussir son **intégration et son développement industriel** ;
- les **modèles existants** pour l'évaluation de la maturité des procédés industriels ne sont que **peu transférables** pour les procédés de FAM ;
- la construction d'un modèle d'évaluation de la maturité spécifique à la FAM pourra **s'appuyer sur les échelles TRL et MRL** en adressant leurs lacunes identifiées. **L'intégration de dimensions durables est nécessaire.**

Ainsi, à partir des limites identifiées dans les modèles existants, la suite du chapitre va développer un modèle d'évaluation de la maturité en se basant sur les forces des modèles existants dans la littérature et en adressant les faiblesses observées.

2.3. DÉFINIR le périmètre du système étudié

Pour concevoir le modèle d'évaluation de la maturité, il est nécessaire de bien définir le périmètre du système étudié : de quel concept cherche-t-on à évaluer la maturité ?

Afin de proposer un modèle permettant d'évaluer la maturité du processus de fabrication dans son ensemble et de la manière la plus précise possible, nous avons choisi de centrer l'évaluation de la maturité sur un couple liant la technologie de FAM utilisée à un cas d'application : *Technology Use Case Couples* (TUCC).

La Table 2.2 présente des exemples de TUCC pouvant être évalués pour une même technologie de FAM (ici le LMD-P pour *Laser Metal Deposition with Powder*).

- Dans l'application A, nous différencions l'usage de la technologie selon l'alliage utilisé. C'est la maturité de l'application de la technologie LMD-P pour fabriquer ce matériau qui sera évaluée pour chaque TUCC.

- Dans l'application B, nous évaluons la maturité de la technologie dans la réalisation de pièces comportant différentes géométries. En effet, les formes géométriques ne sont pas toutes maîtrisées également : les TUCC imaginés ici permettent de différencier l'usage de la technologie selon les géométries à fabriquer.
- Dans l'application C, les TUCC englobent les alliages et les formes géométriques constituant la pièce fabriquée. On considère donc ici des cas d'utilisation plus nombreux et plus précis que dans les applications A et B.

Table 2.2. Exemples de TUCC pour une même technologie de FAM

Application A			
TUCC 1	LMD-P	Titane	
TUCC 2	LMD-P	Acier	
TUCC 3	LMD-P	Aluminium	
Application B			
TUCC 1	LMD-P	Pièce comportant des formes droites	
TUCC 2	LMD-P	Pièce comportant des formes cylindriques	
TUCC 3	LMD-P	Pièce comportant des formes sphériques	
Application C			
TUCC 1	LMD-P	Pièce comportant des formes droites	Titane
TUCC 2	LMD-P	Pièce comportant des formes cylindriques	Acier
TUCC 3	LMD-P	Pièce comportant des formes sphériques	Aluminium
TUCC 4	LMD-P	Pièce comportant des formes droites	Aluminium
TUCC 5	LMD-P	Pièce comportant des formes cylindriques	Titane
TUCC 6	LMD-P	Pièce comportant des formes sphériques	Acier
TUCC 7	LMD-P	Pièce comportant des formes droites	Acier
TUCC 8	LMD-P	Pièce comportant des formes cylindriques	Aluminium
TUCC 9	LMD-P	Pièce comportant des formes sphériques	Titane

Cette étape d'identification et de définition du TUCC à évaluer permet à notre modèle de s'adapter au besoin de l'évaluation selon le contexte d'application. **Les TUCC sont propres à chaque utilisation du modèle.** Ils permettent de mettre en place une évaluation plus précise, qui considère un cas d'utilisation dans son ensemble. Ainsi, **en amont de chaque évaluation, les TUCC sont définis selon les exigences du bénéficiaire, avec l'évaluateur.**

Le **bénéficiaire** désigne la personne ou l'entité qui cherche à obtenir l'évaluation de la maturité, le plus souvent ce sera un centre technique ou une entreprise industrielle. L'**évaluateur** désigne la personne ou l'entité qui va effectuer l'évaluation. La même personne peut être bénéficiaire et évaluateur. Le modèle est créé pour que l'évaluation puisse être réalisable par le bénéficiaire

s'il a les connaissances techniques et organisationnelles nécessaires, mais cela n'est pas obligatoire.

2.4. CONCEVOIR le modèle

La conception du modèle d'évaluation de la maturité proposé est détaillée dans cette section. Ce modèle permet d'obtenir ce que nous appelons le *Additive Manufacturing Readiness Level* (AMRL) de chacun des TUCC définis.

2.4.1. Développer les critères

Huit critères et vingt-deux sous-critères sont définis sur la base des MRL et sont présentés dans la Table 2.3.

Table 2.3. Critères et sous-critères d'évaluation AMRL

	A.1 TRL (niveau de maturité technologique)
A. Technologie industrielle	A.2 Socle industriel A.3 Processus de fabrication
B. Conception	B.1 Industrialisation B.2 Géométrie
C. Matériaux	C.1 Développement matériaux C.2 Disponibilité matériaux
D. Procédé de fabrication	D.1 Modélisation et simulation du procédé <i>D.2 Performances du procédé</i> D.3 Contrôle qualité du produit
E. Équipements	E.1 Environnement de production E.2 Chaîne de production
F. Coûts	F.1 Modélisation des coûts F.2 Analyse des coûts F.3 Budget et stratégie
G. Aspect environnemental	<i>G.1 Modélisation de l'impact environnemental</i> <i>G.2 Analyse de l'impact environnemental</i> <i>G.3 Durabilité du TUCC</i>
H. Aspect social	H.1 Compétences nécessaires <i>H.2 Pénibilité</i> <i>H.3 Modélisation de l'impact sociétal</i> H.4 Management

Les sous-critères du MRL qui ont été jugés pertinents pour la FAM ont été conservés. Les sous-critères écrits en italique sont des éléments environnementaux et sociaux du processus de fabrication qui n'étaient pas ou peu considérés dans les MRL. La répartition des sous-critères dans les critères a été revue pour les organiser selon les dimensions économiques, environnementales et sociales. Le liste de critères présentés fait suite aux différentes itérations de validation du modèle (cf. section 2.6).

Les critères AMRL sont classés en deux catégories : les critères dits **techno-centrés**, relatifs à la **maturité technologique du processus** (critères A à E) et les critères dits **non techno-centrés, relatifs aux dimensions durables du processus** de FAM : à savoir les aspects économiques, environnementaux et sociaux (critères F, G et H).

Pour chaque sous-critère, **une note de 1 à 10** (1 étant le niveau le plus bas, donc le moins mature, et 10 étant le niveau le plus haut, donc le plus mature), basée sur l'échelle globale AMRL, est attribuée, en prenant en compte le contexte spécifique de la FAM et de l'évaluation de TUCC (et non de technologie seule ou du produit fabriqué). Les critères sont définis ci-dessous :

- Le critère A permet de déterminer si la **technologie** actuelle permet le développement du TUCC à échelle industrielle. La maturité de la technologie de fabrication au cœur du TUCC, c'est-à-dire le procédé de FAM en lui-même est évalué (A1). Sa disponibilité et l'état des connaissances dans l'industrie (A.2) ainsi que sa capacité d'intégration au processus de fabrication (A.3) sont également estimés.
- Le critère B est relatif à la phase de **conception** dans la chaîne de production de la FAM. En effet, la FAM permet de nouvelles approches de chaîne de production et de conception. Ce critère permet de prendre en compte les aspects d'industrialisation (B.1) et de la maîtrise de fabrication et de production de différentes géométries (B.2) sous le prisme de la FAM.
- Le critère C mesure la maturité des connaissances du ou des **matériaux d'apport** étudiés dans le TUCC (C.1), ainsi que la maturité de la chaîne d'approvisionnement de ce ou ces matériaux (C.2).
- Le critère D regroupe l'évaluation de la **modélisation du procédé** (D.1), de la maîtrise de ses performances (D.2), et du contrôle qualité des pièces produites (D.3).
- Le critère E détermine la maturité des **équipements** permettant d'assurer la maîtrise des dangers et risques dus au fonctionnement du TUCC sur son environnement immédiat (E.1) et des équipements nécessaires au fonctionnement de l'ensemble de la chaîne de production (E.2).

- Le critère F comprend la modélisation des **coûts** du TUCC (F.1), son analyse (F.2) et la stratégie budgétaire de l'organisation pour la mise en œuvre du TUCC depuis son développement jusqu'à son intégration dans la production à plein régime (F.3).
- Le critère G prend en compte l'**impact environnemental** du TUCC comprenant : la modélisation de l'impact environnemental (G.1), son analyse (G.2) et la stratégie de durabilité de l'organisation pour la mise en œuvre du TUCC depuis son développement jusqu'à son intégration dans la production à plein régime (G.3).
- Enfin, le critère H aborde la **dimension sociale**, comprenant : les compétences à mettre en œuvre pour le développement et la mise en œuvre du TUCC dans la chaîne de production (H.1), la prise en compte de la pénibilité opérateur (H.2), la modélisation de l'impact social du TUCC en termes de cycle de vie (H.3) et de gestion de la production (H.4).

La description des sous-critères est présentée en Annexe 2.A. Pour, exemple, les sous-critères E.1 et E.2 sont détaillés ici :

- E.1 est un sous-critère qui revêt une importance particulière pour la FAM. En effet, les spécificités des matériaux d'apport comme les poudres métalliques requièrent un traitement particulier, pas toujours maîtrisé par les organisations. Dans l'optique du développement d'un TUCC à échelle industrielle, il est indispensable de s'assurer que les équipements nécessaires pour assurer à la fois un environnement de travail protégé, mais aussi la qualité du produit sont identifiés et maîtrisés pour une mise en œuvre en production.
- E.2 permet de prendre en compte la maturité et la disponibilité de l'ensemble des technologies secondaires (autres que la technologie de FAM en elle-même) nécessaires dans le contexte du TUCC pour assurer la production. Les outillages, équipement pour le pré et post process sont-ils identifiés, développés, maîtrisés ? Une stratégie de maintenance de ces équipements est-elle envisagée, élaborée ?

À noter que les questions associées à chaque sous-critère contribuent seulement à la compréhension par le lecteur et ne sont pas formalisées dans l'évaluation.

2.4.2. Construire la méthodologie d'évaluation

Comme pour les modèles TRL ou MRL, le score AMRL est défini entre 1 et 10 ; les niveaux étant adaptés à notre problématique et décrits dans la Table 2.4. Chaque score est associé à un niveau de maturité illustrant le développement du TUCC, des premières étapes de la recherche et développement jusqu'à l'utilisation industrielle à plein régime. Une adaptation des critères et des niveaux de l'échelle d'évaluation MRL a été réalisée pour : (i) s'adapter aux spécificités de la FAM, (ii) intégrer la dimension industrielle durable et (iii) s'adapter à l'évaluation des TUCC.

Table 2.4. Échelle de maturité AMRL

AMRL		
R&D	1	Identification du TUCC, lacunes et opportunités identifiées via les expertises scientifiques et industrielles
	2	Hypothèses assurant la faisabilité du TUCC développées
	3	Faisabilité du TUCC démontrée théoriquement (modèles, calculs)
Prototype	4	Faisabilité du TUCC démontrée en laboratoire
	5	Fabrication d'un prototype validant la faisabilité du TUCC en laboratoire
	6	Fabrication du prototype en environnement de production
Mise en production	7	Optimisation de la fabrication et préparation pour la fabrication à bas régime
	8	Capabilité de production à bas régime démontrée
	9	Initiation de l'amélioration continue et préparation pour le plein régime
	10	Capabilité de production à plein régime démontrée

Le niveau 1 de l'échelle définie correspond à la réalisation d'un état de l'art permettant d'identifier les limites et les risques associés à la réalisation du TUCC. Jusqu'au **niveau 3**, le score AMRL indique que le TUCC est encore à l'étape de **recherche et développement initiale**. Sa faisabilité est étudiée et des premiers modèles sont développés. À partir du **niveau 4**, ces connaissances sont transférées à la réalisation d'un **prototype en laboratoire**. Selon le TUCC défini, ce niveau reflète le développement d'une nouvelle technologie de FAM ou bien la mise en œuvre d'un nouveau matériau avec une technologie existante. Jusqu'au niveau 6, l'échelle indique que le TUCC est en cours de prototypage. Des tests sont réalisés, les modèles et les outils nécessaires à la mise en production sont développés. Le **niveau 7** marque la fin de la phase de développement du prototype du TUCC et **l'initiation de sa mise en œuvre pour la production industrielle** tout d'abord à bas régime. Le niveau 8 reflète la mise en place d'une ligne pilote en environnement de production qui permet de démontrer la réalisation du TUCC pour la production à bas régime. Le développement se poursuit jusqu'à la mise en œuvre industrielle du TUCC au maximum de sa capacité au **niveau 10**. La **qualité** des pièces produites et les **risques sont maîtrisés** et **l'amélioration continue** est en place.

La production industrielle à bas régime et plein régime permet de distinguer le fonctionnement de la ligne de production lors des phases de test et de démarrage (bas régime) et son fonctionnement au niveau de production maximale souhaitée, une fois la ligne prête (plein régime). Nous n'utilisons pas ici les termes de petite, moyenne et grande série, car la FAM n'a pas vocation à produire de grandes séries telles que réalisées avec des moyens de fabrication conventionnels.

Pour **chaque sous-critère, une version adaptée de l'échelle AMRL a été développée pour l'évaluer**. Pour les applications présentées dans ces travaux, l'évaluation est réalisée en [ligne](#)⁵. Il permet de balayer l'ensemble des sous-critères pour un TUCC donné. Pour un TUCC, l'évaluation est estimée à une vingtaine de minutes (durée variable selon l'évaluateur) selon les applications que nous avons réalisées et que nous décrivons à la section 2.5.

2.4.3. Définir la méthode de calcul du score final

Pour chaque critère, le score de maturité est égal à la moyenne du score attribué à chacun de ses sous-critères. L'agrégation du score de maturité au niveau des critères permet de visualiser et de comparer les différences entre les critères. Le bénéficiaire peut ainsi cibler le détail de l'évaluation d'un critère selon sa différence avec les autres critères. Cette approche permet de ne pas perdre le bénéficiaire dû à au nombre élevé de sous-critères. Pour exemple, le score du critère A est la moyenne des scores des sous-critères A.1, A.2 et A.3 ; chaque sous-critère ayant le même poids.

Pour le calcul du score AMRL du TUCC, nous avons choisi, à l'image du modèle développé par Schumacher *et al.* [99], de laisser la possibilité au bénéficiaire du modèle de **pondérer les critères**. Cette pondération permet au bénéficiaire de mesurer l'impact des différents critères en comparant différentes pondérations et également de s'affranchir de critères qui ne seraient pas significatifs dans son contexte d'utilisation. Le décideur évalue l'importance de chaque critère sur une échelle allant de 1 (indifférent) à 4 (nécessaire), tel que présenté en Fig. 2.4. À noter que le bénéficiaire peut définir une pondération égale à tous les critères et qu'ainsi le score AMRL revient à la moyenne des scores des critères.

	1 (indifférent)	2 (peu important)	3 (important)	4 (nécessaire)
A. Technologie Industrielle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B. Conception	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
C. Matériaux	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
D. Procédé de fabrication	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
E. Equipements	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
F. Coûts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
G. Aspect environnemental	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
H. Aspect Social	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fig. 2.4. Pondération des critères dans le modèle AMRL proposé

⁵ <https://forms.office.com/e/GhCu6ixaJm>

Pour chaque critère, la pondération p_i est appliquée au critère i , dont la maturité, $amrl_i$, a été calculée selon l'évaluation réalisée. Enfin, on calcule, pour chaque TUCC, le score final de maturité, d'après les scores de chacun des critères i selon l'équation (2.1) :

$$AMRL = \frac{\sum_{i=1}^n amrl_i \times p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (2.1)$$

2.5. APPLIQUER le modèle pour choisir un TUCC

Le modèle AMRL développé est appliqué pour guider la sélection d'un TUCC comme illustré en Fig. 2.5. Dans un premier temps le modèle AMRL tel que défini précédemment est appliqué. Nous nous plaçons comme bénéficiaire et évaluateur. Les TUCC sont identifiés et tous les sous-critères sont évalués. Les critères sont pondérés et les scores AMRL des TUCC sont obtenus. Cela clôt l'application du modèle AMRL. Il reste ensuite à sélectionner le TUCC en fonction des scores obtenus. Toutes ces étapes sont présentées dans la suite de cette section.

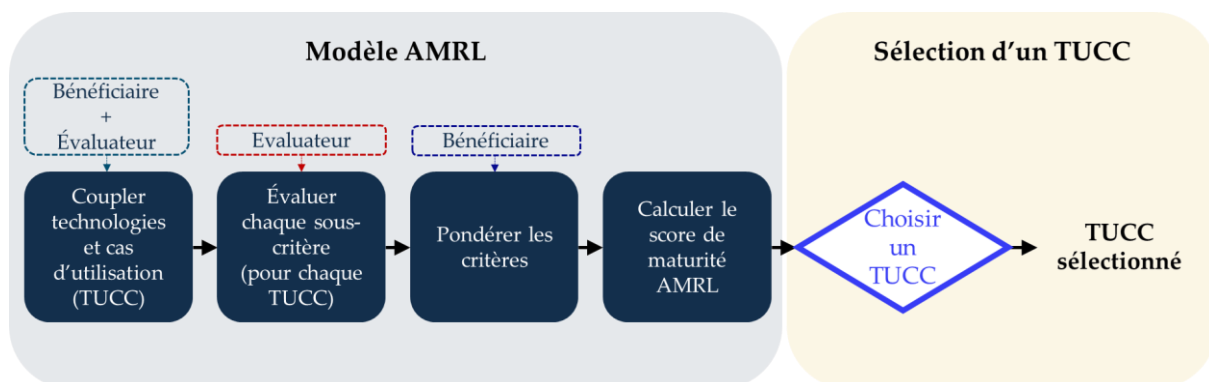


Fig. 2.5. Application du modèle d'évaluation de la maturité proposé pour sélectionner un TUCC DED

2.5.1. Application de l'AMRL

Pour choisir le couple [technologie ; cas d'utilisation] sur lequel sera construit notre modèle de connaissances, nous décidons de considérer la **maturité des procédés DED à notre disposition sur la plateforme Addimadour**.

Coupler technologies et cas d'application

La première étape est la définition des TUCC. Les **technologies** considérées ici sont : **LMD-W**, **LMD-P** et **WAAM-CMT**. Trois **cas d'utilisation** ont été associés à chacune de ces trois technologies. La **fabrication de nouvelles pièces** se réfère à la fabrication d'une pièce à partir de zéro. L'**ajout de fonction**, parfois appelé fonctionnalisation, est l'ajout d'une nouvelle caractéristique à une pièce existante. Et la **réparation** fait référence à la réparation d'un défaut sur une pièce existante.

Ces trois cas d'utilisation ont été choisis, car il s'agit des principales utilisations des procédés DED envisagées pour leur industrialisation à grande échelle [2]. De plus, cela permet de

différencier les cas d'utilisation en fonction de la surface de fabrication (substrat, pièce fonctionnelle ou pièce présentant un défaut). Le **matériau** a été intégré au TUCC, car selon le matériau utilisé, les développements observés sont inégaux. Cela a été observé dans la littérature [11] mais aussi au niveau de la plateforme pour laquelle l'étude est réalisée. Les matériaux sélectionnés pour cette étude de maturité sont les alliages de **titane** et d'aluminium ainsi que l'**acier inoxydable**. Ainsi, au total, vingt-sept TUCC sont définis en couplant technologie, cas d'application et matériau.

Évaluer chaque sous-critère

Pour chaque sous-critère défini dans le modèle, le niveau de maturité sur sa propre échelle est déterminé. Celui-ci est évalué à partir de différentes ressources (observations réalisées, expérience métier des ingénieurs et chercheurs de la plateforme et publications scientifiques).

Par exemple, pour l'évaluation du TUCC [LMD-W ; Nouvelle pièce ; Titane], un prototype industriel a déjà été réalisé, mais la caractérisation des propriétés du matériaux n'est pas encore maîtrisée. Le niveau 5 est donc attribué comme le montre la Fig. 2.6.

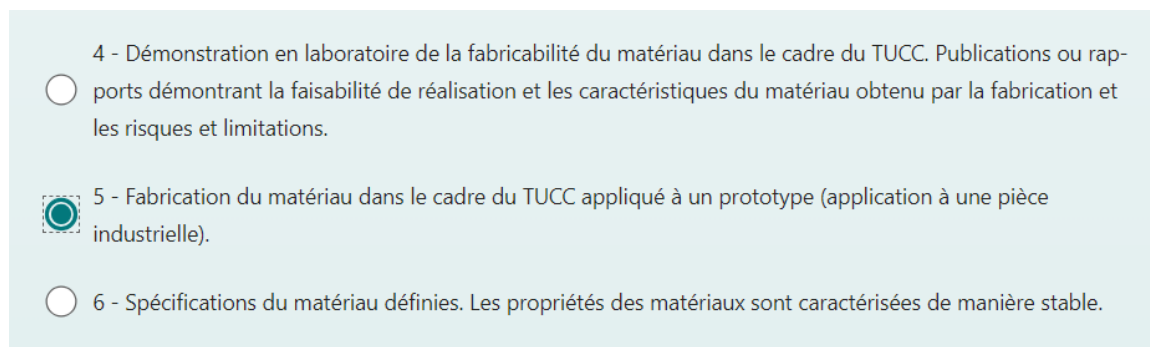


Fig. 2.6. Exemple d'évaluation d'un sous-critère

Le niveau de maturité de l'ensemble des sous-critères de chacun des TUCC est illustré en Table 2.5.

Table 2.5. Évaluation des sous-critères pour les TUCC définis

Technologie	TUCC		AMRL																					
	Cas d'utilisation		Maturité des sous-critères																					
	Application	Matériaux	A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	C.1	C.2	D.1	D.2	D.3	E.1	E.2	F.1	F.2	F.3	G.1	G.2	G.3	H.1	H.2	H.3	H.4
LMD-W	Nouvelle pièce	Titane	5	6	6	4	5	5	4	5	5	4	5	5	3	3	2	1	1	1	4	1	1	3
		Acier Inoxydable	5	6	6	4	5	5	4	5	5	4	6	5	3	3	2	1	1	1	4	1	1	3
		Aluminium	5	6	5	4	3	2	4	5	4	3	4	5	3	3	1	1	1	1	4	1	1	1
	Réparation	Titane	4	4	4	3	4	5	4	5	4	4	4	4	3	3	2	2	2	1	4	2	1	3
		Acier Inoxydable	4	4	4	3	5	5	4	5	4	4	5	4	3	3	2	2	2	1	2	1	1	3
		Aluminium	4	2	2	2	2	2	4	4	4	4	3	3	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1
	Ajout de fonction	Titane	4	4	3	2	2	2	4	3	4	3	2	3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
		Acier Inoxydable	4	4	3	2	2	2	4	3	4	3	3	3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
		Aluminium	4	2	2	2	2	2	4	3	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
LMD-P	Nouvelle pièce	Titane	6	6	5	5	4	5	3	3	4	5	4	4	3	3	2	1	1	1	4	1	1	3
		Acier Inoxydable	6	6	5	5	5	6	3	3	4	5	5	5	3	3	2	2	2	1	4	5	1	3
		Aluminium	4	3	3	3	3	2	3	3	4	3	3	4	2	3	2	1	1	1	3	1	1	3
	Réparation	Titane	5	5	5	4	4	5	3	2	3	5	4	4	3	2	2	1	1	1	4	5	1	3
		Acier Inoxydable	5	5	5	4	4	4	3	4	4	5	4	4	1	1	2	1	1	1	2	1	1	3
		Aluminium	4	3	3	4	3	2	3	2	4	3	4	4	1	2	1	1	1	1	2	1	1	3
	Ajout de fonction	Titane	5	5	4	3	2	4	3	2	4	3	4	3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
		Acier Inoxydable	5	5	4	3	2	4	3	3	4	3	4	3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
		Aluminium	4	2	2	2	2	2	3	2	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
WAAM-CMT	Nouvelle pièce	Titane	6	6	5	4	4	5	4	5	4	4	5	4	2	3	3	1	1	1	3	1	1	3
		Acier Inoxydable	6	6	5	4	4	5	4	5	4	4	6	5	3	5	3	2	2	1	4	5	1	3
		Aluminium	5	6	5	4	4	4	4	5	3	3	4	5	2	3	3	1	1	1	3	1	1	3
	Réparation	Titane	5	5	5	4	4	5	4	3	4	3	5	4	3	3	2	2	2	1	4	1	1	3
		Acier Inoxydable	5	5	5	4	4	5	4	3	4	3	6	5	3	3	2	2	2	1	4	1	1	3
		Aluminium	5	3	3	3	3	2	4	3	4	3	3	5	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
	Ajout de fonction	Titane	4	5	5	2	2	5	4	5	3	4	5	3	3	3	2	2	2	1	4	1	1	1
		Acier Inoxydable	4	5	5	2	2	6	4	5	3	4	6	3	3	3	2	2	2	1	4	1	1	1
		Aluminium	4	2	3	2	2	2	4	3	3	3	2	3	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1

Pondérer les critères

Les critères ont ensuite été pondérés dans le contexte de nos travaux de recherche. Les critères A, C, D, F, G et H sont considérés comme les critères les plus importants avec un coefficient de pondération de 4. En effet, la maturité technologique (critère A) et du procédé de fabrication (critère D) sont le sujet central de nos travaux. Il était également très important de prendre en compte les dimensions durables (critère F, G et H). Enfin, le matériau étant partie intégrante du TUCC (critère C), il était aussi important de différencier la maturité des TUCC sur ce point.

Le critère E (équipements) est pondéré d'un coefficient égal à 3. En effet, la connaissance des effets du procédé sur son environnement de production et les équipements à mettre en œuvre dans la chaîne de production ne sont pas au cœur de nos travaux, ceux-ci étant focalisés sur l'étape de fabrication en elle-même. Cependant, ce critère pouvant impacter les autres (tel que le critère H), il reste au niveau 3 et non à un niveau inférieur. Enfin, le critère B est pondéré d'un coefficient égal à 2, correspondant à « peu important ». En effet, étant focalisé sur l'étape de fabrication de la chaîne de production, la maturité relative à la conception est moins importante dans notre contexte.

Calculer les scores AMRL

À partir des scores attribués à chaque sous-critère, le score de chaque critère pour chaque TUCC est calculé. La Table 2.6 montre les scores de chaque critère pour l'ensemble des TUCC considérés.

Table 2.6. Scores AMRL des TUCC définis

Technologie	TUCC		Total AMRL	AMRL							
	Cas d'utilisation			Maturité des critères							
	Application	Matériaux		A	B	C	D	E	F	G	H
LMD-W	Nouvelle pièce	Titane	3,7	5,7	4,5	4,5	4,7	5,0	2,7	1,0	2,3
		Acier Inoxydable	3,7	5,7	4,5	4,5	4,7	5,5	2,7	1,0	2,3
		Aluminium	3,1	5,3	3,5	3,0	4,0	4,5	2,3	1,0	1,8
	Réparation	Titane	3,4	4,0	3,5	4,5	4,3	4,0	2,7	1,7	2,5
		Acier Inoxydable	3,4	4,0	4,0	4,5	4,3	4,5	2,7	1,7	1,8
		Aluminium	2,4	2,7	2,0	3,0	4,0	3,0	1,7	1,7	1,3
	Ajout de fonction	Titane	2,3	3,7	2,0	3,0	3,3	2,5	1,3	1,0	1,3
		Acier Inoxydable	2,3	3,7	2,0	3,0	3,3	3,0	1,3	1,0	1,3
		Aluminium	2,0	2,7	2,0	3,0	3,0	2,0	1,0	1,0	1,3
LMD-P	Nouvelle pièce	Titane	3,4	5,7	4,5	4,0	4,0	4,0	2,7	1,0	2,3
		Acier Inoxydable	3,9	5,7	5,0	4,5	4,0	5,0	2,7	1,7	3,3
		Aluminium	2,6	3,3	3,0	2,5	3,3	3,5	2,3	1,0	2,0
	Réparation	Titane	3,3	5,0	4,0	4,0	3,3	4,0	2,3	1,0	3,3
		Acier Inoxydable	3,0	5,0	4,0	3,5	4,3	4,0	1,3	1,0	1,8
		Aluminium	2,4	3,3	3,5	2,5	3,0	4,0	1,3	1,0	1,8
	Ajout de fonction	Titane	2,6	4,7	2,5	3,5	3,0	3,5	1,3	1,0	1,3
		Acier Inoxydable	2,6	4,7	2,5	3,5	3,3	3,5	1,3	1,0	1,3
		Aluminium	1,9	2,7	2,0	2,5	2,7	2,0	1,0	1,0	1,3
WAAM-CMT	Nouvelle pièce	Titane	3,5	5,7	4,0	4,5	4,3	4,5	2,7	1,0	2,0
		Acier Inoxydable	4,0	5,7	4,0	4,5	4,3	5,5	3,7	1,7	3,3
		Aluminium	3,3	5,3	4,0	4,0	3,7	4,5	2,7	1,0	2,0
	Réparation	Titane	3,4	5,0	4,0	4,5	3,3	4,5	2,7	1,7	2,3
		Acier Inoxydable	3,5	5,0	4,0	4,5	3,3	5,5	2,7	1,7	2,3
		Aluminium	2,5	3,7	3,0	3,0	3,3	4,0	1,7	1,0	1,3
	Ajout de fonction	Titane	3,2	4,7	2,0	4,5	4,0	4,0	2,7	1,7	1,8
		Acier Inoxydable	3,3	4,7	2,0	5,0	4,0	4,5	2,7	1,7	1,8
		Aluminium	2,1	3,0	2,0	3,0	3,0	2,5	1,3	1,0	1,3

2.5.2. Sélection d'un TUCC

La Table 2.6 donne le score AMRL final pour tous les TUCC considérés dans notre application. Les principaux enseignements sont les suivants :

- Les résultats montrent des niveaux de maturité entre 2 et 4, ce qui signifie que **les TUCC examinés sont encore en phase de recherche et développement** dans le

contexte étudié et selon la pondération des critères définie. Ce premier enseignement est logique au vu du contexte de l'évaluation (plateforme technologique de R&D).

- Dans ce contexte, **le TUCC le plus mature est obtenu pour la fabrication d'une nouvelle pièce en acier inoxydable au moyen du WAAM-CMT**. En effet, ce TUCC est plus proche du niveau 4 que les autres TUCC se situant entre les niveaux 3 et 4.
- La fabrication d'une nouvelle pièce en acier inoxydable avec les procédés WAAM-CMT et LMD-P sont très proches en termes de maturité. Le léger avantage du WAAM est dû à la **problématique de gestion de la poudre en LMD-P** qui ajoute des contraintes en termes de sécurité et d'adaptabilité à l'utilisation de matériaux variés. De plus pour le WAAM-CMT, pour ce TUCC, le critère de coût est plus mature.
- La **fabrication de nouvelles pièces en acier inoxydable et en titane sont les cas d'utilisation les plus matures pour les trois technologies** ce qui est conforme à ce qui a pu être rapporté dans la littérature scientifique au regard des usages des procédés DED dans l'industrie [11].
- Pour les matériaux utilisés, **l'acier inoxydable est le plus mature**, suivi du titane. L'usage d'aluminium au travers des trois technologies et des trois cas d'utilisation est moins mature.
- Pour l'ensemble des TUCC, les niveaux de maturité des différents critères montrent que pour contribuer à leur intégration industrielle, les aspects environnementaux et sociaux doivent être activement considérés.

2.6. VALIDER le modèle

Dans le cadre de nos travaux, bien qu'une seule application ait été réalisée, deux itérations de validation auprès d'experts ont été réalisées. L'application du modèle, telle qu'elle est présentée dans la section précédente (section 2.5), tient compte des ajustements demandés par les experts.

2.6.1. Première itération de validation : recueil de l'avis d'experts

L'objectif de cette première itération est de recueillir les avis d'experts sur la première version du modèle et les résultats obtenus afin d'identifier les axes d'amélioration permettant de le consolider.

Pour cela, des **entretiens** ont été organisés avec **quatre experts** dans le domaine de la FAM. Deux d'entre eux appartiennent à la communauté universitaire (professeurs des universités) et sont ici nommés expert 1 et expert 2. L'expert 1 étudie les processus de FAM depuis plus de

dix ans et l'expert 2 depuis plus de cinq ans. Les deux autres experts travaillent dans l'industrie. L'expert 3 est un ingénieur de recherche chargé d'un processus de FAM sur une plateforme de recherche depuis quatre ans. L'expert 4 est un directeur de projet avec quatorze ans d'expérience dans le domaine de la FAM.

La première version du modèle et les résultats de son application leur ont été présentés. Un entretien a été conduit avec chacun de ces quatre experts. L'entretien consiste en vingt minutes de présentation du modèle et de son application, suivi de vingt minutes de discussions avec l'expert pour recueillir son avis.

Les experts 3 et 4 ont souligné l'**importance de la contribution d'un modèle d'évaluation de la maturité spécifique aux procédés de FAM pour les responsables industriels**. Les experts 1 et 4 ont estimé que le modèle était approprié et que son intégration future dans un modèle d'aide à la décision pour choisir un processus de FA particulier pourrait être envisagée.

Des modifications ont également été recommandées par les experts pour adresser les limites relevées. Tout d'abord, les experts ont évoqué le **calcul du niveau d'AMRL final** à partir de tous les critères évalués. Lors du calcul des critères, il a été initialement considéré la possibilité de calculer la note d'un critère comme étant le niveau minimal de ses sous-critères. Cependant cette méthode entraîne un nivellement par le bas et gomme les différences entre des TUCC proches. L'expert 1 a souligné qu'une telle méthode de calcul était certes sécurisante, mais qu'elle générerait des résultats généralement faibles. Or, de tels résultats ne contribuent pas à convaincre les responsables industriels d'intégrer la technologie ou le processus évalué. L'expert 1 a suggéré d'intégrer une **pondération ou une hiérarchisation des critères**, ce qui conduirait à un résultat plus réaliste, en mettant en évidence les critères positifs et en générant une vision plus "optimiste". Ces remarques ont permis d'aboutir au calcul tel que présenté précédemment sous forme de moyenne et inspiré du modèle d'évaluation de la maturité développé par Schumacher *et al.* [99].

L'expert 4 a souligné qu'il est nécessaire de déterminer si l'évaluation est absolue ou relative. En effet, il est probable que le niveau de maturité soit **spécifique au centre de R&D** où la technologie est évaluée, ou encore au cas d'utilisation considéré. En effet, chaque organisation se distingue selon le niveau de compétences, l'expérience (en années et en projet) et la culture industrielle liée aux procédés évalués. Cette notion d'organisation ou de localisation pourrait même être intégrée au TUCC. Dans l'application, **l'organisation à laquelle a été appliquée le modèle a été spécifiée**.

L'expert 1 a signalé que l'état de préparation technologique ainsi que la **disponibilité des compétences** et des connaissances d'un TUCC spécifique devraient être ajoutés aux critères évalués. Cette remarque a donné lieu au sous-critère H.1 qui n'avait pas été retenu dans la première version du modèle.

Selon l'expert 4, étant donné que le modèle vise à évaluer les technologies émergentes associées à des cas d'utilisation, il devrait être **mis à jour fréquemment**. Et l'évaluation devra être

effectuée régulièrement, car la maturité des technologies et des processus de FAM est en constante évolution [86]. Ainsi, une réévaluation périodique pourra être définie.

La complexité de la modélisation et de l'évaluation des critères de durabilité a été évoquée du fait de la complexité de modéliser l'ensemble du cycle du vie. Doit-on considérer l'ensemble du processus et des investissements réalisés, ou seulement le coût de fabrication d'une seule pièce ? L'importance de ces considérations pour la FAM a déjà été soulignée dans la littérature [120,121].

Avec ces retours, **la première version du modèle a été modifiée** sur les points suivants :

- Les sous-critères et leurs échelles d'évaluation respectives ont été enrichis en les détaillant davantage.
- Le matériau a été ajouté aux TUCC initiaux qui ne comprenaient que la technologie associée au cas d'utilisation. De plus, la définition du périmètre d'évaluation des TUCC est prise en compte.
- La possibilité de pondérer l'importance des critères pour le calcul du score final a été ajoutée.

2.6.2. Seconde itération de validation : mesure de la fiabilité des résultats

L'objectif de cette seconde itération est de mesurer la **fiabilité des résultats obtenus** au travers de la deuxième version du modèle et d'identifier de futures pistes d'améliorations du modèle. Pour cela, les résultats obtenus pour l'évaluation des sous-critères des TUCC par six participants sont analysés.

Les **indices de fiabilité relative** permettent de mesurer l'accord entre participants à un même questionnaire. L'analyse de l'écart entre les réponses permet de statuer sur l'accord des participants au résultat via l'utilisation du modèle. Millet [122], a comparé différents indices de mesure d'accord entre participants. Il apparaît que l'**alpha de Krippendorff** (noté α_K) est un indicateur fiable qui prend en compte les données manquantes [123]. Au vu du nombre important de TUCC évalués (27) et du temps d'évaluation de chacun (supérieur à 20 minutes), ils ne pourront pas tous être évalués par tous les experts. L'évaluation intégrera donc des données manquantes, justifiant l'usage de l'indice α_K . Un consensus est considéré si $\alpha_K > 0,67$ [124].

La seconde itération de validation est réalisée avec les ingénieurs et chercheurs de la plateforme Addimadour. Six profils ont été sélectionnés. Chaque profil a un niveau d'expertise d'au moins cinq ans dans la FAM. Dans un premier temps, le modèle et son utilisation ont été présentés conjointement aux participants. Puis, chaque participant a évalué deux TUCC. Ainsi, un total de six TUCC ont été évalués par six participants différents à raison de deux TUCC par participant (soit douze évaluations). L'évaluation est réalisée au travers du [questionnaire](#)

AMRL. Après l'évaluation des deux TUCC par chaque participant, un entretien oral permet de recueillir son retour sur le modèle.

Les six participants ont donc évalué chacun deux TUCC parmi les suivants :

- LMD-W | nouvelle pièce | titane
- LMD-P | nouvelle pièce | acier inoxydable
- WAAM-CMT | nouvelle pièce | acier inoxydable
- LMD-W | réparation | titane
- LMD-P | réparation | titane
- WAAM-CMT | ajout de fonction | titane

Les TUCC à évaluer ont été choisis pour intégrer les différents matériaux, cas d'utilisation et technologies. L'aluminium n'est pas représenté dans les TUCC évalués dû à sa faible maturité.

Les résultats des évaluations anonymisées pour chaque sous-critère de chaque TUCC sont donnés en Annexe 2.B Puis l'accord entre les évaluations a été mesuré.

L'indice α_K est mesuré avec le logiciel IBM SPSS Statistics et la macro KALPHA [123] pour les trois évaluations obtenues pour chacun des six TUCC sélectionnées (deux évaluations dans le cadre de la validation plus notre évaluation présentée ci-dessus en section 2.5.1). Les calculs permettant d'obtenir α_K sont détaillés en Annexe 2.C. La macro est exécutée pour sept observateurs, cent trente-deux unités (vingt-deux critères pour six TUCC) et un niveau de mesure ordinal. Le résultat obtenu est $\alpha_K = 0,66$. L'indice est inférieur au consensus qui correspond à une valeur de 0,67.

Cependant, le résultat est très proche du consensus. Nous considérons donc que l'application peut être validée, mais à relativiser par rapport au désaccord observé entre les participants. En effet, certains évaluateurs ont été plus généreux que d'autres dans leur évaluation (mais en demeurant homogène dans l'évaluation des deux TUCC à leur charge). Cela peut être dû :

- aux profils d'expert qui diffèrent. En effet, les profils varient de directeur de plateforme à ingénieur procédé. Nous pouvons supposer que ces profils ne partagent pas le même niveau de connaissances de tous les TUCC.
- à la précision du modèle qui permet des évaluations trop variées. Les échelles ne sont peut-être pas comprises ou pas assez précises. Pour y remédier, des perspectives d'améliorations du modèle sont proposées.

Sur la base de l'évaluation de la maturité, selon les besoins exprimés, le contexte étudié et la pondération appliquée, le procédé WAAM-CMT pour la fabrication de nouvelles pièces en acier inoxydable est choisi pour la suite de nos travaux.

2.6.3. Perspectives d'améliorations du modèle

Les itérations de validation du modèle ARML ont permis de confirmer les scores de maturité obtenus. Ces itérations ont également permis de cibler les limites et perspectives d'améliorations du modèle afin de le rendre encore plus précis et de faciliter son utilisation future. Celles-ci sont détaillées ci-après :

- La dénomination des critères de A à F peut conduire à un **biais d'importance des critères** selon leur ordre. Pour le pallier, une disposition et une dénomination aléatoires des critères permettront de passer outre.
- Une version améliorée du modèle pourra détailler des **questions pour chaque sous-critère** (cf. Annexe 2.A). Le niveau du sous-critère sera alors déterminé en fonction des réponses données aux questions. Cela permettra à l'évaluateur de se détacher des intitulés des échelles de chaque sous-critère et d'accentuer la **transparence et la précision de l'évaluation**.
- Une **étape de validation** optionnelle des résultats par des experts pourra être envisagée pour les premières utilisations du modèle. Des itérations pourront être réalisées en prenant en compte les remarques des experts pour améliorer l'évaluation. Après plusieurs applications du modèles, validées à leur tour, celui-ci sera qualifié. Ainsi cette étape optionnelle et potentiellement lourde pour l'utilisateur sera supprimée. De plus, une **évaluation collective** menant à un consensus pourrait aboutir à une évaluation consolidée. Cela pourrait réduire le biais de l'évaluation dû au niveau d'expertise et de connaissances de l'évaluateur (limite déjà relevée pour le MRL).
- Dans l'optique d'une utilisation industrielle du modèle, une **automatisation du calcul** à partir des réponses récoltées sur une interface en ligne favorisera sa portée. Dans la même optique, une **interface** d'affichage des résultats et de pondération des critères interactive favorisera son utilisation future.
- Le modèle a été développé spécifiquement pour l'évaluation de la maturité des technologies de FAM. Son application a des procédés de FA polymères ou variés permettra d'identifier les adaptations à apporter pour l'étendre à l'ensemble des procédés de FA.

2.7. Conclusion

Ce deuxième chapitre a permis la sélection du procédé DED WAAM CMT comme base pour le développement d'un modèle de performances. Le choix d'une technologie DED, et plus

largement de FAM, pour son intégration industrielle, se base en effet sur la maturité technologique. Or, nous avons vu qu'il n'existait pas de modèle d'évaluation de la maturité spécifique à la FAM. Dans ce chapitre, la méthode suivie et les tâches associées à chaque étape, présentées en Fig. 2.7, ont permis le développement d'un tel modèle.

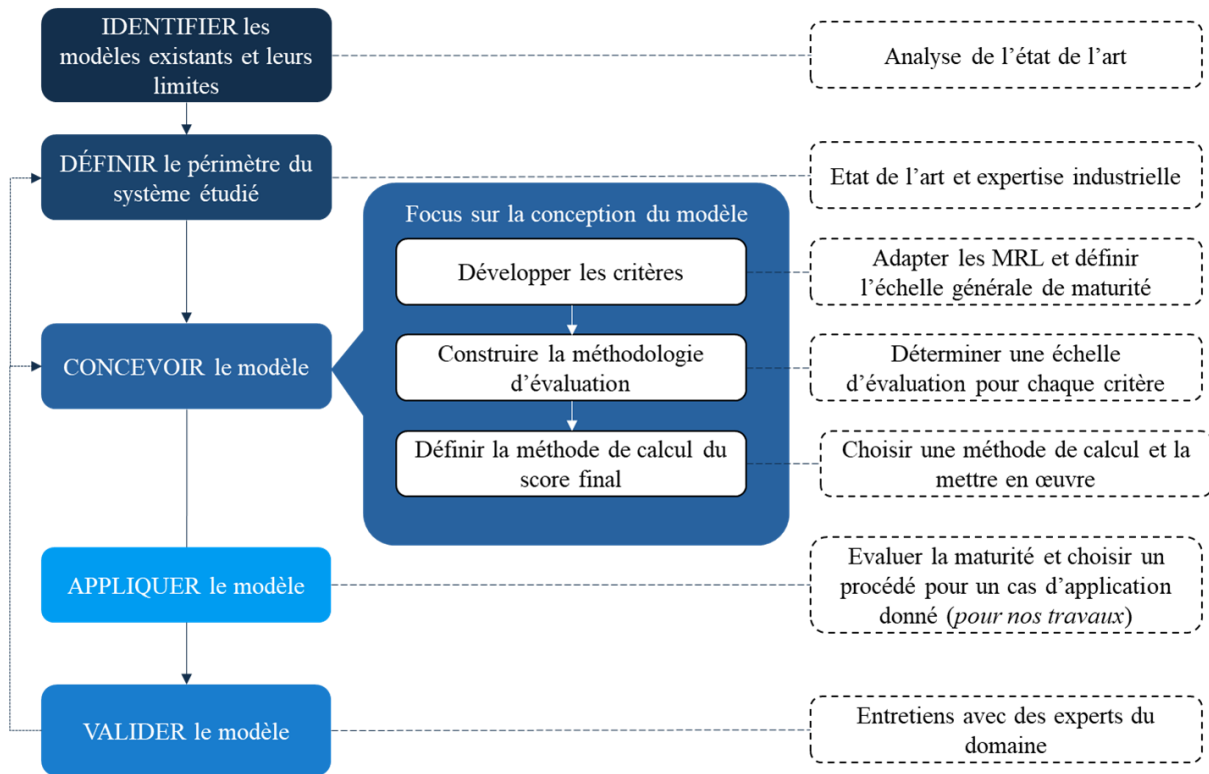


Fig. 2.7. Méthodologie utilisée pour développer le modèle AMRL

À partir de l'état de l'art, les manques des modèles existants pour l'évaluation de la maturité technologique des procédés de fabrication et de FAM ont été identifiés. Cela a déterminé le choix de s'appuyer sur les échelles TRL et MRL pour le développement de notre modèle.

Le modèle développé permet d'évaluer la maturité d'une technologie de FAM couplée à un cas d'utilisation, dit TUCC. Les TUCC à évaluer sont à définir avant chaque utilisation du modèle. Le modèle AMRL permet d'évaluer les TUCC en fonction de huit critères et vingt-deux sous-critères englobant des dimensions techno-centrés (les matériaux ou la chaîne d'approvisionnement par exemple) et non techno-centrés (comme le coût ou l'impact environnemental). Puis, les critères sont pondérés, et un score AMRL est obtenu. La pondération permet une personnalisation de l'évaluation de la maturité selon les applications.

Le modèle AMRL permet d'évaluer la maturité des TUCC DED et de FAM. Son usage pourra être étendu plus largement à la FA, les critères et sous-critères ayant été déterminés dans ce but. Un tel modèle permet d'identifier les axes d'améliorations des TUCC pour cibler les améliorations nécessaires pour monter en maturité et contribuer à leur adoption industrielle. Il permet aussi de réaliser un état des lieux de la maturité des technologies de FAM dans le

contexte d'une entreprise ou d'un laboratoire / centre technique, ou encore de choisir quelle technologie intégrer selon sa maturité.

Le modèle AMRL proposé a été appliqué pour choisir une technologie DED parmi celles à notre disposition comme base de nos travaux. Cette application a permis de valider le modèle en comparant les scores de maturité obtenus avec différents évaluateurs. **Le TUCC retenu pour la suite des travaux est la fabrication d'une nouvelle pièce en acier inoxydable par le procédé WAAM-CMT.** Parmi les TUCC évalués, il a été déterminé comme le plus mature, grâce au modèle AMRL.

La validation de l'application, en deux itérations, a permis de consolider le modèle, de confirmer la pertinence des scores AMRL obtenus selon les TUCC et de cibler des perspectives d'améliorations.

Le prochain chapitre va définir le de modèle de performances du procédé WAAM-CMT appliqué à la fabrication de nouvelles pièces en acier inoxydable. Ce modèle devra permettre de caractériser l'influence des paramètres de fabrication sur les performances ciblées.

Chapitre 3.

Définition d'un modèle de performances pour le procédé WAAM-CMT

Sommaire

3.1.	État de l'art : mesure de la performance	56
3.1.1.	Performance des systèmes industriels.....	56
3.1.2.	Indicateurs de performance économique, environnementale et sociale.....	57
3.1.3.	Mesure de la performance pour le WAAM-CMT	62
3.1.4.	Synthèse	68
3.2.	Méthodes de modélisation des performances	69
3.2.1.	Précision dimensionnelle.....	69
3.2.2.	Force maximale admissible	70
3.2.3.	Durée de fabrication.....	70
3.2.4.	Coût de fabrication.....	71
3.2.5.	Éco-score	72
3.2.6.	Modèle prédictif : relations entrées-sorties.....	73
3.3.	Le modèle de performances proposé	74
3.3.1.	Synthèse du modèle de performances.....	74
3.3.2.	Méthodologie pour appliquer le modèle de performances.....	75
3.3.3.	Conclusion	76

Ce chapitre est l'étape 2.a du cadre de référence envisagé, comme illustré sur la Fig. 3.1. Il s'agit de la définition du modèle de performances. Ce chapitre adresse la deuxième question de recherche :

QR2 : « Comment modéliser la performance d'une pièce fabriquée en DED sur les plans mécanique et industriel durable ? »

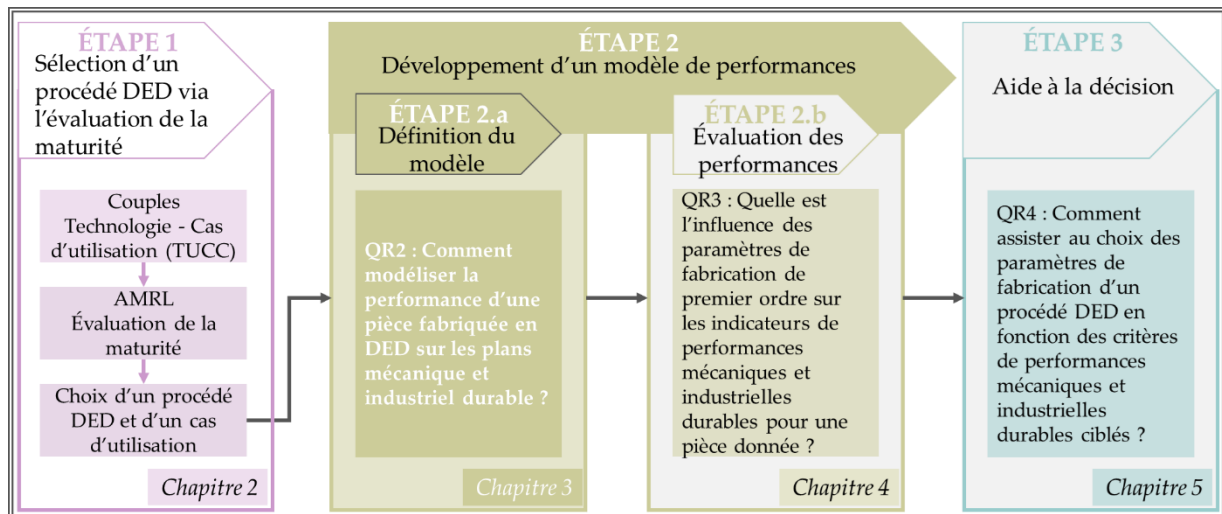


Fig. 3.1 Positionnement du chapitre 3 dans le cadre méthodologique de référence envisagé

Pour y répondre, ce chapitre présente la définition d'un modèle liant les performances mécaniques et industrielles durables aux paramètres de fabrication du procédé WAAM comme illustré en Fig. 3.2.



Fig. 3.2. Modèle de performances recherché

Tout d'abord, un état de l'art sur la performance des systèmes industriels, et traitant en particulier des indicateurs de performance pour le WAAM, est présenté en section 3.1. Puis, les méthodes pour caractériser les indicateurs retenus dans le modèle sont détaillées en section 3.2. La section 3.3 synthétise le modèle défini et présente la méthodologie d'application.

3.1. État de l'art : mesure de la performance

3.1.1. Performance des systèmes industriels

Pour les processus de fabrication, la maîtrise des performances contribue à assurer la maturité du procédé. En section 1.2.1, la performance d'un procédé de fabrication est décrite comme la mesure du niveau d'adéquation du système à répondre aux exigences du client (efficacité) liée à la juste utilisation des ressources mises en œuvre pour y répondre (efficacité).

Pour être fructueuse, une stratégie d'entreprise vise à proposer au client un produit qui répond à ses attentes tout en assurant la santé financière de l'entreprise. Une entreprise manufacturière, dans un environnement compétitif, doit être capable, par exemple, de fabriquer des produits de bonne qualité à bas prix [125,126]. La vision, la stratégie et les objectifs sont définis selon les parties prenantes (clients, investisseurs, employés) au travers des notions de qualité, de productivité, d'innovation, de flexibilité et de finance [127]. Pour suivre cette stratégie, les performances de l'ensemble de l'organisation, et notamment au niveau du procédé de fabrication, doivent être maîtrisées et améliorées [128]. Le rôle de la mesure de la performance est d'aider au contrôle opérationnel et stratégique. Le contrôle opérationnel assure la capacité (aptitude à satisfaire les spécifications du client) des éléments du processus de fabrication. Le contrôle stratégique examine les conséquences de chaque étape du processus de fabrication [129]. Ainsi, la mesure de la performance dans une organisation permet à différentes échelles (horizon de temps, périmètre), d'assurer le suivi des stratégies et des objectifs.

L'organisation désigne l'ensemble des processus décisionnels, opérationnels, et supports, permettant de délivrer le produit au client. Les processus opérationnels comprennent notamment les chaînes d'approvisionnement, les processus de fabrication et la livraison. D'un point de vue stratégique, la performance d'une organisation a été classiquement désignée comme financière, et basée sur des indicateurs économiques globaux tels que le bénéfice, le chiffre d'affaires et le retour sur investissement.

À l'échelle opérationnelle, pour le processus de fabrication, les études scientifiques s'accordent pour définir la mesure de la performance selon plusieurs dimensions. Les indicateurs les plus souvent considérés correspondent à une **dimension économique** : **qualité, disponibilité, flexibilité** et **coûts** [29,128,130].

Comme évoqué dans l'introduction, l'industrie du futur requiert d'intégrer la **durabilité** dans la prise de décision stratégique, et aussi au niveau opérationnel pour le pilotage des procédés de fabrication, en particulier pour la FAM [118]. Les indicateurs issus de l'approche classique, centrés sur la dimension économique, ne sont plus suffisants. La définition d'indicateurs de performance afin d'évaluer l'atteinte des objectifs pour les **dimensions environnementales et sociales** est nécessaire.

Dans la section suivante, les dimensions économique, environnementale et sociale sont définies ainsi que les indicateurs correspondants utilisés dans la littérature. Nous compléterons ce travail par des mesures de la performance spécifiques au procédé WAAM, venant s'intégrer dans les dimensions précédentes.

3.1.2. Indicateurs de performance économique, environnementale et sociale

Dimension économique

Qualité

La qualité fait référence à la **conformité** du produit par rapport à ses spécifications. Elle agrège la qualité de chaque fonctionnalité du produit. La qualité peut être mesurée de manière globale : le produit est accepté ou rejeté. Pour la fabrication en série, la répétabilité du procédé peut être considérée, c'est-à-dire sa capacité à fabriquer chaque pièce de manière conforme. Dans ce cas, la qualité est mesurée à l'aide de tests statistiques qui permettent de s'assurer de la qualité de l'ensemble de la production sans devoir mesurer chaque unité. Le rapport entre le nombre de pièces acceptées et le nombre de pièces fabriquées est un indicateur communément utilisé dans l'industrie. Le surcoût engendré par la fabrication de pièces non-conformes est un autre indicateur relatif à la qualité [131].

La qualité peut aussi être mesurée de manière désagrégée afin de juger de chaque caractéristique du produit de manière quantifiable. Cette approche permet une meilleure compréhension des mécanismes du procédé. Généralement, **la qualité est catégorisée selon la géométrie fabriquée et les caractéristiques physico-chimiques du matériau fabriqué.**

La qualité relative à la géométrie d'une pièce fabriquée se mesure selon sa conformité aux tolérances dimensionnelles (cotation), aux tolérances géométriques (par exemple la planéité, le parallélisme ou la circularité) et à son état de surface. Ces aspects sont mesurés différemment selon le type de pièce fabriquée (une pièce comportant des surfaces fonctionnelles usinées sera évaluée différemment d'un brut de fonderie).

Pour la FA, la **précision dimensionnelle** permet de caractériser la qualité géométrique des pièces fabriquées en estimant les écarts entre la surface de la pièce fabriquée et la surface idéale de la pièce telle qu'obtenue par CAO [132]. Les irrégularités d'une surface peuvent être caractérisées par une mesure de rugosité.

La qualité relative aux caractéristiques physico-chimiques est mesurée selon plusieurs échelles :

- à l'échelle microscopique, la composition chimique du matériau et sa microstructure déterminent ses **propriétés mécaniques**, sa conductivité, sa dureté ;
- à l'échelle de la pièce fabriquée, ces propriétés définissent la **résistance mécanique** selon les sollicitations auxquelles la pièce est soumise. Celles-ci dépendent de son

utilisation et son spécifiés dans le cahier des charges. Elles génèrent des **contraintes mécaniques**, qui peuvent être de différents types : quasi-statiques, dynamiques ou cycliques.

Ces contraintes mécaniques sont calculées selon les appuis et chargements appliquées à une pièce et les propriétés du matériau, pour une pièce donnée. Cela est fréquemment réalisé à partir de la Modélisation par Eléments Finis (MEF). De cette manière des indicateurs comme la **force maximale admissible** peuvent être calculés selon les contraintes auxquelles est soumise la pièce. Pour la FAM, plusieurs études ont explicité la méthode à suivre pour déterminer la contrainte équivalente et la déformation totale d'une pièce sous sollicitation quasi-statique. Karthick *et al.* [133] ont étudié le dimensionnement d'un vilebrequin fabriqué en FAM, soumis aux efforts des pistons du moteur. Wang *et al.* [134] ont étudié les performances mécaniques d'une pièce de structure dans le domaine de la construction.

L'apparition de défauts à l'échelle microstructurale, comme les porosités ou l'oxydation, peuvent impacter sévèrement la tenue mécanique d'une pièce.

Disponibilité

La disponibilité reflète la capacité à respecter **les délais et les quantités de production et de livraison**. La disponibilité d'un processus de fabrication se traduit à l'échelle du procédé de fabrication, par des indicateurs tels que le taux de production et l'efficacité du procédé. Le taux de production théorique d'un processus, correspond aux pièces produites par unité de temps, en émettant l'hypothèse que le processus est utilisé à son plein potentiel et sans interruption. Le taux de production réel d'un processus correspond au nombre de pièces produites par unité de temps, en tenant compte à la fois des interruptions imprévues telles que les pannes de machines, les retards et les non-conformités de pièces. L'efficacité du processus, en termes de taux de production, est le rapport entre le taux réel et le taux théorique [131].

Pour un procédé de fabrication, le **temps de fabrication** du procédé mesure le temps nécessaire à la réalisation de l'ensemble des opérations (ou cycles de fabrication) permettant la fabrication. Certaines opérations peuvent être réalisées en temps masqué : elles sont réalisées en même temps qu'une autre opération, ce qui procure un gain de temps.

Pour la FA, le temps de fabrication est indicateur de la productivité et du rendement du procédé. C'est un élément important pour les industriels. Il est utilisé dans plusieurs travaux visant à proposer des éléments de choix pour l'intégration industrielle des procédés de FA. Achillas *et al.* [48] ont calculé le temps de production de divers procédés de FA polymère en y intégrant le temps de fabrication, défini comme le temps de fabrication d'une couche multiplié par le nombre de couches. Colomo *et al.* [135] ont également intégré le temps de fabrication dans leur approche pour aider au choix d'une procédé de FAM pour l'industrie aéronautique.

Flexibilité

La flexibilité est la capacité du processus à s'adapter à différentes demandes en termes de quantité ou de type de produits. La flexibilité caractérise la capacité du procédé à fabriquer des pièces et des produits variées, et à permettre la variation des cadences de production [131].

Les indicateurs de flexibilité mesurent les coûts et le temps nécessaires à la mise en œuvre des changements. Ces indicateurs intègrent des données incertaines et des approches probabilistes, qui les rendent complexes. De plus, les probabilités d'apparition d'un changement sont spécifiques à chaque cas étudié en fonction du système étudié et des demandes potentielles associées à ce système.

D'autres approches ont été définies. Des ratios entre temps de préparation (en amont) et temps de cycle ont été proposés, mais ne reflètent qu'un aspect de la flexibilité à l'échelle d'une usine. Un indice de versatilité a été proposé par Makino [136]. Cet indice est défini par le nombre de changements apportés en une année au système de fabrication.

Les procédés DED sont flexibles car ils permettent de s'adapter facilement à différentes tailles de pièces. De plus le changement de matériau, notamment pour les technologies à fil, est relativement aisé. Cependant, **les indicateurs présentés concernent davantage l'évaluation du procédé pour un ensemble d'applications** dans un contexte industriel, et ne sont pas adaptés à nos travaux.

Coûts

Pour la dimension économique, les coûts sont liés à la productivité. En effet, une organisation doit utiliser ses ressources pour générer de manière pérenne un profit opérationnel qui permet de soutenir ses activités.

Pour un procédé de fabrication, le **coût de fabrication** est défini. Il comprend l'investissement initial des machines et des infrastructures, leur coût d'utilisation, le coût des ressources consommées et le coût humain [131]. Plusieurs modèles de coût existent. Pour la FA, ils ne sont pas toujours standardisés et sont souvent spécifiques à une application malgré des similitudes.

L'*activity based costing model* (ABC) consiste à décomposer les activités du processus de fabrication et à définir les facteurs de coûts pour chacune d'elles [137]. Des taux de coûts associés à chaque activité sont calculés. Le coût est ensuite calculé en appliquant les taux aux ressources consommées et analysés pour chaque opération du processus. Les ressources comprennent les ressources humaines (concepteurs, main-d'œuvre, etc.), les équipements/machines et les consommables (matière première, outils). Le coût global est ainsi décomposé selon différents centres de coûts. Cette approche est particulièrement intéressante pour l'étude de systèmes de fabrication comportant de multiples étapes. Pour un procédé simple, cela revient à l'analyse d'un seul centre de coût et la démarche ABC n'est pas adaptée.

Dimension environnementale

Selon l'[Agence de la Transition Écologique](#)⁶, l'**impact environnemental** traduit l'ensemble des modifications qualitatives, quantitatives et fonctionnelles de l'environnement, négatives ou positives engendrées par un procédé. Ces impacts peuvent affecter les écosystèmes, les réserves de ressources naturelles, ou la santé humaine directement.

Plusieurs indicateurs permettent d'évaluer la performance environnementale d'un procédé de production. Le procédé peut être évalué selon sa consommation énergétique, les déchets qu'il produit, ou son empreinte carbone [138]. Cependant, ces indicateurs ne prennent pas en compte l'ensemble des impacts environnementaux. Des méthodes permettant une prise en compte globale des impacts ont donc été développées.

L'un des outils les plus complets pour analyser les aspects et les impacts environnementaux est l'**analyse de cycle de vie (ACV)**, définie par la SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry, USA and Europe*) comme une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux liés à l'utilisation d'un produit, d'un processus de production ou d'une activité dans des limites spécifiées, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa décomposition, en passant par les processus de production, de transport, d'utilisation, de réutilisation, d'entretien et de recyclage [139]. L'ACV est reconnue comme la méthode la plus précise et la plus complète pour évaluer l'impact environnemental des procédés de fabrication. Elle est définie par la norme ISO 14044 :2006 [140].

Les ACV réalisées pour les procédés de FAM utilisent la méthodologie ReCiPe. ReCiPe a été développé par Goedkoop *et al.* [141] et une nouvelle version, ReCiPe 2016 a été proposée par Huijbregts *et al.*[142]. Cette méthode permet de caractériser l'impact environnemental par rapport à dix-huit catégories *midpoints* ou intermédiaires, ensuite agrégées en trois catégories *endpoints* ou finales, comme présenté dans la Table 3.1. À noter que deux catégories intermédiaires impactent simultanément deux catégories finales : la consommation d'eau et le réchauffement climatique sont intégrés aux dommages sur la santé humaine et dans les dommages aux écosystèmes. Les résultats pour chaque catégorie intermédiaire sont calculés puis agrégés en catégories finales. Les impacts finaux sont convertis en **éco-score**, exprimé en points (Pts).

⁶ ADEME: <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/elements-contexte/impacts-environnementaux>

Table 3.1. Catégories et unités considérées pour le calcul d'impact environnemental à partir de ReCiPe 2016 [142]

Catégories d'impacts intermédiaires	Unité	Catégories d'impacts finales	Unité
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	Santé Humaine	DALY
Réchauffement climatique	kg CO2 eq		
Toxicité humaine cancérigène	kg 1,4-DCB		
Toxicité humaine non-cancérigène	kg 1,4-DCB		
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq		
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq		
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq		
Consommation d'eau	m3		
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	Raréfaction des ressources	USD2013
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq		
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	Ecosystèmes	species.yr
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq		
Réchauffement climatique	kg CO2 eq		
Utilisation des sols	m2a crop eq		
Écotoxicité marine	kg 1,4-DCB		
Eutrophisation marine	kg N eq		
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq		
Acidification des sols	kg SO2 eq		
Écotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB		
Consommation d'eau	m3		

Dimension sociale

L'impact social d'un procédé de fabrication traduit les **effets positifs ou négatifs du procédé sur l'écosystème humain qui l'entoure** [138]. Les opérateurs sont impactés selon la pénibilité de mise en œuvre de ce procédé. Au travers du produit fabriqué, le procédé peut avoir un impact sur les futurs utilisateurs, mais également sur l'organisation de la société de par les flux logistiques qu'il engendre ou les services qu'il génère, par exemple. Ces effets peuvent être suivis de retombées économiques et environnementales. Pour la dimension sociale, il n'existe pas aujourd'hui de modèle permettant d'évaluer cet impact. L'évaluation des impacts sociaux tels que la santé et la sécurité, les conditions de travail, la création d'emplois, pour n'en citer que quelques-uns, ne sont présentés dans la littérature que dans les perspectives de recherche pour les années à venir [143].

Dans cette section, les indicateurs de performance selon les dimensions économiques, environnementales et sociales pour les procédés de fabrication ont été discutés. Les indicateurs de performance économique incluent la **qualité de la pièce (géométrique et mécanique)**, et le **coût et le temps de fabrication**. Les indicateurs de performance environnemental quantifient

l'impact environnemental du procédé. Pour la performance sociale, il n'existe pas d'indicateur robuste. Celle-ci est tout de même est liée aux autres dimensions. Ainsi, nous définissons **cinq indicateurs de performances mécaniques et industrielles durables** :

- **la précision dimensionnelle ;**
- **la force maximale admissible, définie par les propriétés mécaniques ;**
- **le temps de fabrication ;**
- **le coût de fabrication ;**
- **l'éco-score ;**

Dans la prochaine section, les travaux relatifs à ces indicateurs pour le WAAM-CMT dans la littérature sont étudiés. L'influence des paramètres de fabrication pour ces indicateurs est relevée.

3.1.3. Mesure de la performance pour le WAAM-CMT

Dimension économique - Précision dimensionnelle

La caractérisation de la géométrie de cordons et de pièces monocordons a été étudiée. Pour des fils d'aciers de diamètres de 0,8 et 1,2 mm, une épaisseur de cordon déposé de 3,5 à 8 mm est atteinte selon les paramètres de fabrication [79,144,145]. Leur épaisseur et le taux de dépôt dépendent de plusieurs paramètres du procédé, notamment l'apport d'énergie (e_i), la vitesse d'alimentation du fil (WFS), l'épaisseur du fil et la vitesse de la torche (TS).

Posch *et al.* [146] ont étudié l'état de surface de pièces monocordons en acier inoxydable duplex. Une surface comparable à celle obtenue par laminage à chaud, ou moulage au sable, a été obtenue. La qualité de l'état de surface a été mesurée par sa **rugosité**. La rugosité absolue de la surface (R_a) est de 24,5 μm , et la distance moyenne (R_z) entre le pic le plus élevé et la vallée la plus basse est de 135,3 μm . Ces valeurs sont convenables, mais nécessitent tout de même une reprise en usinage pour les surfaces fonctionnelles ($R_a < 0,5 \mu\text{m}$). Ainsi, **la rugosité n'est pas un indicateur adéquat pour mesurer la précision dimensionnelle en WAAM**. En effet, le procédé permet de fabriquer des pièces à l'état de surface grossier qui seront post-traitées par la suite.

Rosli *et al.* [66] ont étudié l'impact de l'**apport d'énergie**, selon les valeurs de la **TS**, du **courant** et de la **tension** de l'arc électrique, sur la précision dimensionnelle des pièces monocordons fabriquées en acier 304 de dimensions 120 mm x 40 mm x 5 mm. Pour cela, **les variations de hauteur de la pièce et son écart par rapport à la hauteur ciblée** ont été mesurés. Une machine à mesurer tridimensionnelle a permis de mesurer la hauteur sur tout le long de la surface supérieure du mur et l'erreur quadratique moyenne calculée. Des écarts de 0,6 à 1,2 mm ont été relevés mettant en évidence l'impact de l'apport de chaleur sur la géométrie de la pièce.

L'étude a permis la modélisation de la variation de hauteur en fonction des paramètres. Cependant, l'étude est limitée à une pièce monocordon.

Pour l'acier inoxydable 316L, un modèle prédictif a été développé par Lee [147] en utilisant une méthode de régression gaussienne (méthode de régression multiple intégrant la prise en compte d'incertitudes) pour la fabrication d'un mur monocordon. Ce modèle permet de prédire la précision dimensionnelle, caractérisée par la **différence de hauteur**, et son angle d'inclinaison, en fonction des paramètres **TS**, **WFS** et du **temps inter-couche**. Les valeurs optimales des paramètres sont $WFS = 3,5 \text{ m/min}$; $TS = 0,5 \text{ m/min}$; $t_{ic} = 30 \text{ s}$.

Ces études soulignent que précision dimensionnelle des pièces fabriquées en acier inoxydable en WAAM est liée à la vitesse d'alimentation du fil, à la vitesse de torche, au courant de soudage, au temps inter-couche et à la température inter-couche. Des études permettant l'optimisation des paramètres du procédé pour obtenir une meilleure précision dimensionnelle de surface des pièces WAAM sont nécessaires [148].

Dimension économique – Propriétés mécaniques

Xie *et al.* [60] ont étudié les **propriétés de traction** selon les directions horizontales et verticales et la **dureté** pour un mur monocordon en acier 316L fabriqué en WAAM CMT. Les résultats de traction montrent une différence entre les valeurs de résistance mécanique obtenues selon la direction horizontale ($R_m = 487 \text{ MPa}$) et verticale ($R_m = 531 \text{ MPa}$). La dureté varie de 175 à 145 HV en décroissant selon la hauteur de la pièce.

Bourlet [26] a étudié l'impact de WFS et TS, ainsi que de différents traitements thermiques post fabrication, sur la **dureté**, les **propriétés de traction**, et la **résistance à la rupture** des pièces épaisses en acier 316L. Ses résultats mettent en avant une isotropie des caractéristiques mécaniques. Les valeurs des propriétés de traction ($R_{e0,2} = 290 \text{ MPa}$; $R_m = 570 \text{ MPa}$; $A\% = 40\%$), et de résilience pour les deux couples de paramètres (WFS, TS) testés ne permettent pas de conclure à un impact de celles-ci. La dureté varie de 235 HV2 à 170 HV2. Cependant, davantage de valeurs doivent être testées afin de pouvoir évaluer l'impact de ces paramètres. Les traitements thermiques réalisés peuvent être une cause d'homogénéisation des propriétés mécaniques.

Muller *et al.* [149] ont étudié l'impact de WFS, TS et de la température inter-couche sur un mur monocordon en acier à haute résistance, AM80. Leur étude a montré qu'**un apport de chaleur plus élevé cause une diminution des propriétés mécaniques** ($R_{e0,2}$ et R_m). De plus, un apport de chaleur élevé combiné à une température d'inter-couche élevée diminue la résilience du matériau.

En faisant varier l'apport de chaleur de 260 à 470 J/mm, Cunningham *et al.* [79] ont constaté des **variations du module d'élasticité** (de 165 GPa à 141 GPa) et de la limite à rupture (de 579 MPa à 565 MPa) pour la fabrication d'acier 316L en WAAM CMT.

La Table 3.2 présente les résultats de plusieurs travaux étudiant l'impact des paramètres de fabrication sur les propriétés de traction d'acier 316L fabriqué par WAAM. **On y observe des écarts dus à différents paramètres de fabrication.** Cependant, aucun modèle analytique n'a été développé reliant les propriétés de traction ou la dureté d'une pièce aux paramètres du procédé.

Wu *et al.* [150] ont étudié les propriétés mécaniques d'un mur monocordon fabriqué en acier 316L en WAAM. Ils ont étudié l'impact des paramètres de fabrication en faisant varier WFS, TS, le courant et la tension de soudage et le temps inter-couche. **La dureté et la résistance à la traction augmentent avec une valeur de TS élevée ou un temps inter-couche long.** La valeur moyenne de dureté obtenue est de 175 ± 2 HV. Les valeurs de $R_{e0,2}$ et de R_m moyennes sont respectivement de 339 MPa et 583 MPa.

Table 3.2. Comparaison des propriétés de traction obtenues dans diverses configurations

Procédé	R_m (MPa)	R_e (MPa)	E (GPa)	A%	Ref
Standard industriel	450	170	190	40	[151]
WAAM CMT	533 ± 23	235 ± 6	-	48 ± 2	[151]
WAAM CMT	550 ± 6	418	-	-	[152]
WAAM CMT	565 ± 17	314 ± 16	146 ± 18	43 ± 6	[79]

De nombreuses études ont exploré les propriétés mécaniques de traction et de dureté de différentes notions d'acier pour fabrication de pièces monocordon avec le procédé WAAM-CMT. Peu d'études ont caractérisé les propriétés mécaniques obtenues pour des pièces épaisses. Au vu de l'influence des paramètres de fabrication sur les propriétés mécaniques du matériau fabriqué, les relations entre ces paramètres et le comportement mécanique des pièces fabriquées doivent être définies pour maîtriser les performances du procédé [23].

Dimension économique - Temps de fabrication

Dans le cadre du procédé WAAM, le temps qui s'écoule entre le début et la fin de la fabrication est décomposé selon le **temps de soudage** et le **temps inter-couche**.

Le temps de soudage, t_s , correspond au temps de dépose de matière via la torche de soudage. Il dépend de la trajectoire de fabrication et de TS. En effet, plus le déplacement du robot est rapide plus la trajectoire est parcourue rapidement.

Le temps inter-couche, t_{ic} , est le temps de refroidissement entre le dépôt de la couche n et celui de la couche $n+1$. La température inter-couche, T_{ic} , est la température de refroidissement correspondante. Lors du paramétrage du procédé :

- soit t_{ic} est fixe et la température est variable au cours de la fabrication. Pour les couches les plus élevées, la température augmente [153];

- soit T_{ic} est fixe et le temps inter-couche est variable au cours de la fabrication. Pour les couches les plus élevées, le temps inter-couche augmente [153].

La température de la pièce en fonction du temps dépend de l'apport de chaleur du procédé, du matériau et de la géométrie de la pièce.

Pour le WAAM, le temps de fabrication est un indicateur clé pour les industriels. Il est important à maîtriser afin d'assurer la disponibilité de la production. Le temps de fabrication est également utilisé pour déterminer le taux de fabrication. Cet indicateur détermine la quantité de matière déposée par unité de temps. Il est fréquemment utilisé pour comparer les procédés DED entre eux. Pour le WAAM-CMT, il est généralement de l'ordre de 2 à 3 kg/h [11].

Enfin, l'indicateur de temps influe directement sur le coût comme cela va être discuté dans la prochaine sous-section.

Dimension économique - Coût de fabrication

Le coût de fabrication, élément de décision majeur pour les industriels, a fait l'objet de nombreuses études.

Facchini *et al.* [154] ont développé un modèle de coût pour le WAAM en se concentrant sur les coûts d'ingénierie non-récurrents. Ce modèle évalue les temps de conception, d'industrialisation et de développement nécessaires pour la production de pièces avec le procédé WAAM. Il prend également en compte le coût humain des employés mobilisés, le coût du matériau d'apport, le taux de déposition et le nombre et les dimensions des unités produites. Ce modèle a été utilisé pour comparer le coût du WAAM avec le coût d'un procédé conventionnel. L'étude conclut que le procédé conventionnel est moins cher pour un nombre de pièces par lot inférieures à trois. Cela est dû aux efforts nécessaires pour concevoir et industrialiser la pièce pour être fabriquée en WAAM. Ce modèle est adapté pour évaluer les coûts nécessaires pour l'intégration et le développement du procédé WAAM, bien **que les coûts d'achats et d'entretien de la machine ne soient pas pris en compte**. Pour les coûts de fabrication, son utilisation paraît limitée du fait qu'il **ne considère pas les ressources consommées autre que le matériau d'apport**.

Cunningham *et al.* [82] ont développé un modèle de coût pour le WAAM basé sur la méthode ABC. Le modèle prend en compte les étapes de préparation du substrat, de traitement thermique, d'usinage et de contrôle qualité. Pour la phase de fabrication en WAAM, les paramètres WFS, TS et le débit de gaz sont pris en compte. Appliqué à la fabrication d'une pièce en titane, ce modèle évalue que le WAAM est moins cher que les technologies PBF. Enfin, **ce modèle a identifié le coût lié au gaz de protection comme ayant une grande incidence sur le coût total pour des pièces de grandes dimensions**.

Priarone *et al.* [83] ont mesuré le coût de fabrication de diverses pièces industrielles fabriquées en WAAM. Ils ont considéré les coûts de FAM et d'usinage post production. Pour le WAAM, les **coûts des consommables**, les **coûts de production** (installation, préparation du substrat, construction des pièces), les **coûts de main-d'œuvre**, et les **coûts de livraison** ont été pris en compte. Leur étude indique **que les coûts dépendent principalement du matériau utilisé, ce qui indique une forte influence de la quantité de matière utilisée sur le coût de fabrication.**

Dias *et al.* [155] ont développé un modèle de coût pour évaluer la viabilité économique du WAAM. Le modèle prend en compte les **coûts fixes** (équipements, infrastructure et administration) et les **coûts variables** (matériau, main d'œuvre et énergie consommée). Ce modèle est très détaillé, mais s'appuie principalement sur des valeurs théoriques. Il devra être validé expérimentalement pour confirmer, par exemple, la validité de la consommation énergétique théorique (le temps d'utilisation de la machine multiplié par sa puissance) comparée à des valeurs réelles d'utilisation). Ce modèle a été appliqué à une pièce en acier 316L de forme conique. Ces travaux soulignent que **le coût de la matière première est la catégorie de coût la plus élevée pour le WAAM.**

Kokare *et al.* [143] ont développé un modèle de coût conjointement à une approche ACV pour évaluer l'impact environnemental du WAAM pour la fabrication d'un mur monocordon en acier ER70. Les coûts de fabrication considèrent le **coût en ressources consommées** (gaz, électricité), en **matière première**, en **équipements** (investissement machine, outillage, maintenance), en **main d'œuvre** et en **post-process**. Ce modèle, particulièrement adapté au WAAM, adresse de manière détaillée les coûts de la phase de fabrication. Cependant, il requiert de mesurer à chaque fabrication la consommation des différentes ressources. Leur étude a permis de comparer les coûts du WAAM, d'un procédé d'usinage et d'un procédé PBF. **Le WAAM est plus économique que les deux autres procédés et le principal facteur de coût est ici la main d'œuvre.** Cela semble être dû à la petite taille de la pièce considérée (inférieure à 0,3 kg).

Ces travaux ont mis en avant les méthodes de calcul du coût de fabrication pour le WAAM. Le facteur de coût le plus important est la consommation de matière première. Plusieurs de ces études de coût ont été menées conjointement à des études d'impact environnemental.

Dimension environnementale – Éco-score

Les études les plus récentes sur l'impact environnemental du WAAM évaluent toutes l'impact environnemental en utilisant la méthodologie ACV.

Priarone *et al.* [83], conjointement à l'analyse de coût réalisée sur le cadre en aluminium fabriqué en WAAM, ont également évalué l'impact environnemental de la fabrication par WAAM-CMT pour la comparer à la fabrication conventionnelle. Une démarche ACV permettant de prendre en compte les impacts environnementaux depuis la production du fil métallique jusqu'à l'usinage de la pièce fabriquée en postproduction a été réalisée. Pour mesurer l'impact environnemental, la **consommation électrique**, la consommation de **gaz** et

la consommation de **matière première** ont été mesurées et analysées. La **demande d'énergie cumulée** pour les différentes étapes de l'ACV a été calculée à partir des conversions existantes pour ces ressources dans la base de données CES Selector Database. Cette étude montre que **l'impact environnemental est lié au rendement du procédé** (matière consommée / matière produite). Le WAAM a donc un impact moindre en termes d'énergie cumulée demandée. Le choix d'un unique indicateur ne permet pas de cibler les impacts environnementaux du WAAM.

Dias *et al.* [155] ont également mené une étude ACV conjointement à l'étude de coût présentée ci-dessus. Ils ont analysé l'impact environnemental depuis l'extraction de la matière première jusqu'à la phase de fabrication d'une pièce conique en acier 316L de 0,9 kg. L'impact de la **matière première** (fil et substrat), du **gaz**, et de **l'électricité consommée** a été étudié. Puis, avec un logiciel d'ACV et les bases de données concordantes, **l'éco-score** a été calculé d'après la **méthode ReCiPe**. Pour les trois catégories définies, ressources, écosystèmes et santé humaine, la fabrication en WAAM cause moins de dommage que le procédé d'usinage. Un éco-score de 2 Pts est obtenu contre 6 Pts pour le procédé d'usinage. Les résultats obtenus ont été validés par une analyse statistique (méthode de Monte Carlo).

Kokare *et al.* [143] ont déterminé l'impact environnemental en réalisant une ACV, conjointement à l'étude de coût pour une mur en acier ER70, de masse 78 g, détaillée ci-dessus. À l'aide de la méthode ReCiPe, l'éco-score a été calculé. Le **transport des ressources** a été intégré au calcul d'impact environnemental de la **matière première** (fil et substrat), du **gaz** et de **l'électricité consommée**. Pour la fabrication de cette géométrie, le fraisage à commande numérique, un procédé PBF et le WAAM ont été comparés. L'étude a déterminé que le procédé d'usinage conventionnel (37–51 mPts) a moins d'impact environnemental que le WAAM (87–107 mPts) et que le PBF (352–448 mPts). Les auteurs ont identifié que **le plus gros facteur d'impact est la transformation de la matière première**. Pour une pièce de petite taille, le procédé conventionnel a un impact moins élevé.

Shah *et al.* [156] ont étudié l'impact environnemental d'une poutre en acier 304, de 23,6 kg. Cette poutre, optimisée topologiquement, est comparée à la poutre d'origine de 50,2 kg. L'étude a pris en compte le **matériau d'apport**, le **gaz** et la **consommation électrique** du procédé, mais aussi les **émissions de fumées de soudage** et les **projections de métal en fusion**. Pour alimenter l'ACV, en suivant la méthode **ReCiPe**, les auteurs ont utilisé des données de la littérature. Cette étude théorique a montré que **l'impact environnemental du WAAM est significativement lié à WFS**. En effet, une augmentation de WFS augmente le taux de déposition et permet de réduire l'impact environnemental.

Ces travaux ont mis en avant une méthode commune et complète pour étudier l'impact environnemental du procédé WAAM : ReCiPe. La fiabilité de cette méthodologie a été validée par analyse statistique et l'influence des paramètres de fabrication sur l'impact environnemental a été soulignée.

3.1.4. Synthèse

L'état de l'art sur les performances du procédé WAAM CMT, spécifiquement appliqué à la fabrication de pièces en acier, a montré que plusieurs travaux ont caractérisé avec succès les performances mécaniques, économiques, environnementales et sociales. Les performances mécaniques pour le WAAM évaluent principalement sa précision dimensionnelle et les caractéristiques mécaniques du matériau produit. Les autres performances permettent de mesurer le temps de fabrication, le coût et l'impact environnemental.

Table 3.3. Synthèse de l'influence des paramètres de fabrication du WAAM sur les performances

Paramètres	Performances mécaniques et industrielles durables				
	Précision dimensionnelle	Propriétés mécaniques	Temps de fabrication	Coût de fabrication	Éco-score
WFS	++	+		+	+++
TS		+	++	+	
e_i	+++	++			
T_{ic}		+	+++		
t_{ic}			+++		
Débit gaz				+	+

La Table 3.3 synthétise les effets des paramètres de fabrication tels que présentés dans l'état de l'art. Il apparaît que pour les performances considérées, WFS et TS sont les paramètres les plus influents. En effet, ils agissent également au travers de l'apport de chaleur e_i .

Cependant, cette influence n'est que peu quantifiée. Certains travaux ont permis le développement de modèles prédictifs de certains indicateurs en fonction des paramètres de fabrication. Ces rares études sont concentrées sur la fabrication de murs monocordons, qui ne sont pas toujours représentatifs des pièces industrielles.

À partir de ces constats, nous proposons de modéliser la performance de la phase de fabrication avec le procédé WAAM comme un système de cinq indicateurs :

- la force maximale admissible ;
- la précision dimensionnelle ;
- le temps de fabrication ;
- le coût de fabrication ;
- l'éco-score.

Ces indicateurs sont évalués en fonction des paramètres de fabrication identifiés comme les plus influents, à savoir, WFS et TS.

La prochaine section présente les méthodes utilisées pour développer un tel modèle.

3.2. Méthodes de modélisation des performances

3.2.1. Précision dimensionnelle

La mesure de la précision dimensionnelle entre la surface de la pièce fabriquée, appelée **surface fabriquée**, et la surface obtenue par CAO, appelée **surface CAO** est illustrée en Fig. 3.3a et Fig. 3.3b. La surface fabriquée est représentée en noir et la surface CAO en bleu.

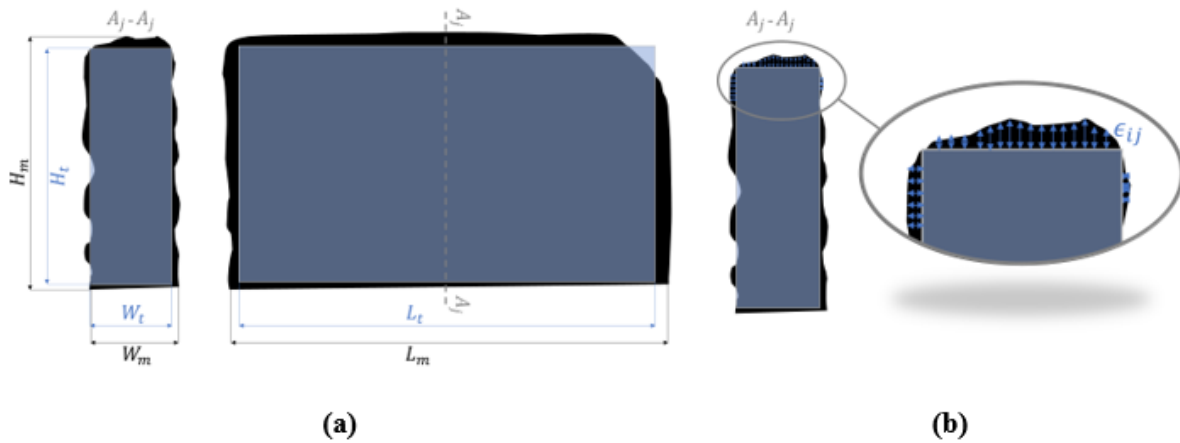


Fig. 3.3 Schéma présentant la différence entre la surface fabriquée (en noir) et la surface CAO (en bleu) en vue générale (a) et en coupe transversale (b) afin de calculer la précision dimensionnelle

Pour évaluer l'adéquation entre la surface fabriquée et la surface CAO, la distance entre chaque paire de points ϵ_{ij} des deux surfaces est mesurée sur l'ensemble de la pièce.

Puis, pour chaque pièce, la distance moyenne entre tous les points des deux surfaces est calculée. La distance moyenne (d_{moy}) et maximale (d_{max}) entre chaque paire de points des deux surfaces sont mesurées, comme indiqué dans la littérature [157,158]. Elles sont définies par les équations 3.1 et 3.2.

$$d_{moy} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \epsilon_{ij}}{i \times j} \quad (3.1)$$

$$d_{max} = \max (\epsilon_{ij}) \quad (3.2)$$

La précision dimensionnelle ($d_{\%}$) est définie comme d_{moy} ramenée à un pourcentage des dimensions de la pièce, en l'occurrence sa hauteur cible (H_t), comme le décrit l'équation 3.3. La hauteur cible (H_t), représentée sur la Fig. 3.3.a, est dans notre cas de 160 mm.

$$d_{\%} = 1 - \frac{d_{moy}}{H_t} \quad (3.3)$$

Pour caractériser la précision dimensionnelle, la pièce fabriquée est alors représentée sous forme d'un nuage de points, puis est comparée à la CAO de la pièce et $d_{\%}$ est obtenu à partir des équations 3.1 à 3.2 et 3.3.

3.2.2. Force maximale admissible

La force maximale admissible, F_{max} , est définie comme la **sollicitation maximale que peut supporter une pièce sans se déformer plastiquement**. Pour cela, le **critère de Von Mises** est employé.

Pour une pièce soumise à une force F , la contrainte équivalente de Von Mises, σ_{VM} , est calculée numériquement. Si l'inégalité présentée en équation 3.4 est respectée, la pièce reste donc dans son domaine élastique.

$$\boxed{\text{on cherche } F_{max}, \text{ telle que } \sigma_{VM} \leq \sigma_{adm}} \quad (3.4)$$

$$\text{Avec } \sigma_{adm} = \frac{R_{e0.2}}{s} \quad (3.5)$$

$R_{e0.2}$ est la limite d'élasticité du matériau et s est le coefficient de sécurité.

La Fig. 3.4 illustre la méthode MEF, qui permet d'obtenir la force maximale admissible. Dans le cas d'étude présenté, les propriétés du matériau en traction sont déterminées (notamment la limite d'élasticité $R_{e0.2}$).

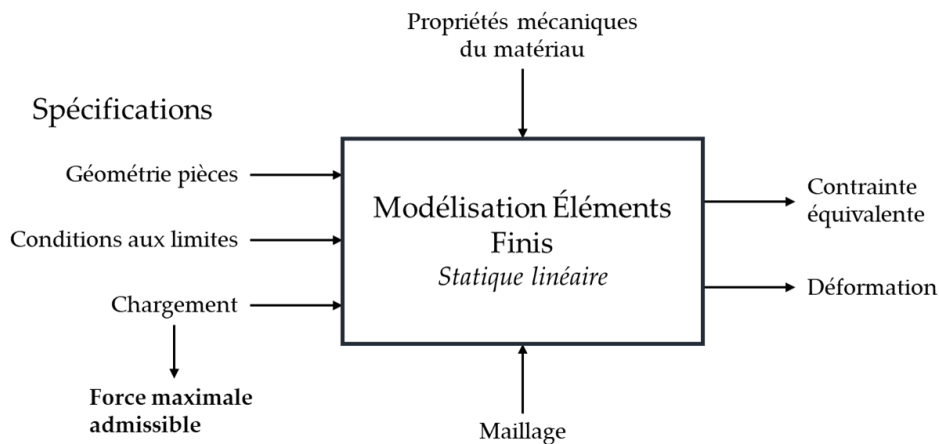


Fig. 3.4. Obtention de la force maximale admissible par MEF

3.2.3. Durée de fabrication

Pour le WAAM, le temps total de fabrication d'une pièce est la somme du temps de soudage, t_s et du temps inter-couche, t_{ic} . Pour la fabrication de pièces industrielles de grandes dimensions, t_{ic} devient un temps masqué : en effet, la trajectoire de la torche pour chaque couche est longue : son temps de parcours est alors supérieur au temps inter-couche. De plus, la fabrication de plusieurs pièces en série avec la même machine peut être également envisagée et permet aussi de considérer t_{ic} en temps masqué.

Nous faisons donc l'hypothèse que le temps de fabrication est égal à la somme des temps de soudage, t_s , de chaque couche n , comme exprimé par l'équation 3.6.

$$t_{fab} = \sum_{i=1}^n t_{s_i} \quad (3.6)$$

3.2.4. Coût de fabrication

Le coût de la pièce fabriquée est calculé selon les facteurs de coûts identifiés dans la littérature et présentés en Fig. 3.5. L'objectif est de pouvoir identifier les variations de coût en fonction des variations des paramètres de fabrication. Les facteurs de coûts identifiés en vert désignent les facteurs variables en fonction de WFS et TS. Les facteurs en noir sont pris en compte pour modéliser le coût de manière précise et réaliste.

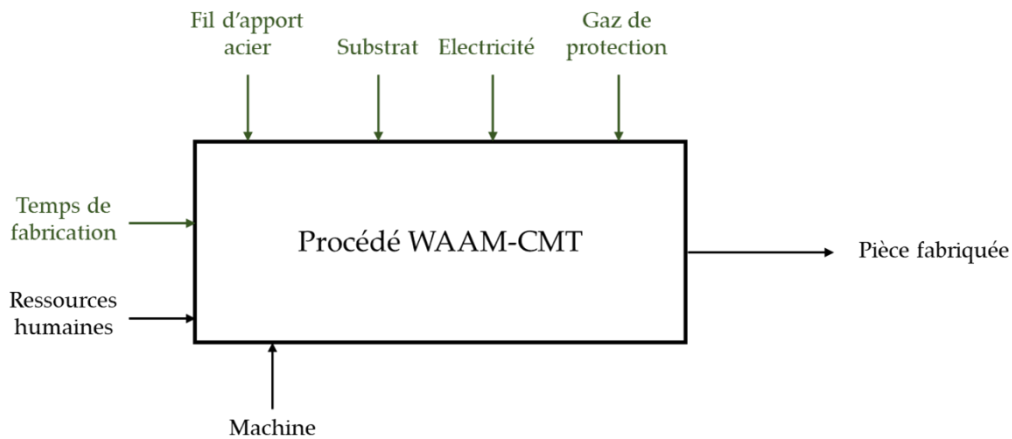


Fig. 3.5. Représentation des facteurs de coûts pour le cas d'application considéré

À partir de la littérature [143], l'équation 3.7 présente le calcul du coût de fabrication d'une pièce en WAAM :

$$C_{fab} = C_{machine} + C_{matériau} + C_{ressources} + C_{humain} \quad (3.7)$$

Où le coût total de fabrication d'une pièce, C_{fab} , est réparti en 4 catégories de coûts :

- $C_{machine}$ correspond aux coûts d'utilisation de la machine
- $C_{matériau}$ correspond au coût du matériau consommé via le fil et le substrat
- $C_{ressources}$ correspond aux ressources consommées, le gaz et l'électricité
- C_{humain} correspond au coût de la main d'œuvre

Les équations 3.8 à 3.11 explicitent le calcul des coûts :

$$C_{machine} = t_{fab} \times C_{machine_hr} \quad (3.8)$$

$$C_{matériau} = C_{fil} + C_{substrat} = M_{fil} \times Prix_{fil} + M_{substrat} \times Prix_{substrat} \quad (3.9)$$

$$C_{ressources} = C_{gaz} + C_{elec} = V_{gaz} \times Prix_{gaz} + P_{elec} \times Prix_{elec} \quad (3.10)$$

$$C_{humain} = t_{travail} \times Salaire \quad (3.11)$$

Le coût machine horaire, $C_{machine_hr}$, dépend du temps d'utilisation annuel de la machine, t_{ann} , et du coût annuel de la machine, C_{machin_ann} , selon l'équation 3.12. C_{machin_ann} est donné par l'équation 3.13.

$$C_{machine_hr} = \frac{C_{machin_ann}}{t_{ann}} \quad (3.12)$$

$$C_{machin_ann} = \frac{Prix_{machine}}{années\ d'utilisation} + C_{outil} + C_{maint} + C_{service} + C_{immo} \quad (3.13)$$

Où :

- $Prix_{machine}$ est l'investissement initial d'achat de l'ensemble de la machine ou cellule de fabrication ;
- C_{outil} représente le coût annuel des outillages et consommables de la machine ;
- C_{maint} représente le coût annuel de maintenance de l'équipement ;
- $C_{service}$ comprend le coût d'utilisation des logiciels nécessaires au fonctionnement de l'équipement ;
- C_{immo} est le coût d'immobilisation au sol, qui revient au prix du bâtiment au m² divisé par la superficie de la cellule de fabrication.

Si C_{outil} et C_{maint} ne peuvent être obtenus précisément via le suivi des achats effectués, Pusavec *et al.* [159] les ont évalués respectivement à 2 % et 3% de l'investissement initial.

3.2.5. Éco-score

La méthode ACV, appliquée au procédé de fabrication selon la norme ISO 14044 :2006 [140], permet de quantifier la variation de l'impact environnemental de la pièce fabriquée par rapport à la variation des paramètres de fabrication (WFS, TS). L'unité fonctionnelle de l'ACV est ici un kilogramme d'acier 316L déposé sur le substrat. L'inventaire sur lequel se base la mesure de l'impact environnemental pour le procédé WAAM-CMT est présenté en Fig. 3.6 et a été réalisé en adéquation avec les ACV développées dans la littérature pour le WAAM.

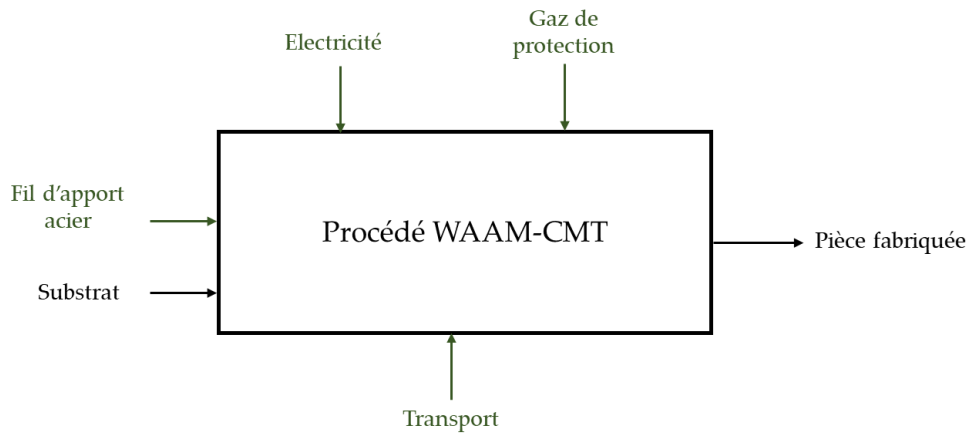


Fig. 3.6. Ressources et processus identifiés dans l'inventaire pour la modélisation de l'ACV

Les éléments de l'inventaire identifiés en vert sur la figure sont directement ou indirectement influencés par la variation des paramètres de fabrication [156]. Le transport de ces éléments vers le lieu de fabrication est pris en compte dans l'inventaire. Les émissions gazeuses et de chaleur ne sont pas prises en compte. En effet, celles-ci sont difficilement mesurables et leur estimation est encore trop imprécise. Des travaux de recherche ont identifiés un lien entre l'émission des fumées de soudage, la puissance de soudage et la température inter-couche mais sans le caractériser précisément [160]. Toutefois, dans le cadre de notre étude, la consommation énergétique de la cellule de fabrication englobe le fonctionnement de la hotte d'aspiration permettant de traiter les fumées toxiques. Les déchets ne sont pas pris en compte. Le rendement du procédé WAAM étant particulièrement élevé, ceux-ci sont négligeables.

D'après la méthode ReCiPe, les catégories d'impacts intermédiaires (cf. Table 3.1) sont calculées selon l'équation 3.14 :

$$I_c = \sum_i CF_{c,i} \times m_i \quad (3.14)$$

où I_c est le résultat indiqué pour la catégorie d'impact c , $CF_{c,i}$ est le facteur de caractérisation de l'élément i de l'inventaire pour la catégorie d'impact c et m_i est la quantité de l'élément i consommée. Les facteurs $CF_{c,i}$ sont calculés et mis à disposition dans des bases de données par la communauté scientifique. Les valeurs m_i sont mesurées lors de la fabrication.

À partir des résultats de catégories d'impact intermédiaires, I_c , l'éco-score est calculé selon une pondération p_i , sélectionnée par la méthode ReCiPe d'après l'équation 3.15.

$$\boxed{Eco - score = \sum_i I_{c,i} \times p_i} \quad (3.15)$$

3.2.6. Modèle prédictif : relations entrées-sorties

Cinq indicateurs de performances ont été définis. Grâce à l'état de l'art, les paramètres du procédé les plus influents sur les performances ont été identifiés en section 3.1.4 : WFS et TS. Dans l'optique du choix des paramètres du procédé selon les performances mécanique et

industrielle durable, nous cherchons à **modéliser la relation entre ces paramètres et les indicateurs de performances du procédé**.

La **régression multiple** est une technique mathématique utilisée pour modéliser la relation entre plusieurs variables d'entrées indépendantes et une variable de sortie [161]. Cette technique est adaptée pour la prédiction de données continues qui peuvent être exprimées par une fonction linéaire ou polynomiale. Dans notre cas, la régression polynomiale multiple est adaptée : nous traitons des données continues, en fonction de plusieurs variables dont l'influence sur les sorties est avérée.

L'analyse en **surfaces de réponse** est une méthode statistique qui permet de développer un modèle prédictif basé sur la régression multiple [162]. Le développement de modèles prédictifs nécessite la réalisation d'essais expérimentaux correspondant aux points d'échantillonnages définis par un **plan d'expériences** (*Design of Experiments* en anglais – DOE) préalablement définie [163].

Les **plans factoriels** permettent de déterminer les effets de chaque entrée du système ainsi que leurs effets d'interaction. Pour **deux variables**, une **fonction polynomiale de degré deux** permet de modéliser la relation entre la sortie (indicateur de performance) et les entrées (WFS et TS). L'utilisation d'un tel plan d'expériences permet d'évaluer la validité du modèle obtenu en fonction des données à partir d'outils statistiques tels que l'analyse de la variance (ANOVA) [164].

Nous faisons l'hypothèse que les indicateurs de performances sélectionnés, en sortie du modèle, peuvent être approximés à partir d'une fonction polynomiale de degré deux des paramètres de fabrication en entrée, ici WFS et TS.

3.3. Le modèle de performances proposé

3.3.1. Synthèse du modèle de performances

La Fig. 3.7 synthétise le modèle proposé. Les paramètres d'entrée étudiés ont été choisis selon leur influence, d'après la littérature. Les indicateurs de performance, qui constituent les sorties du modèle, ont été choisis à partir de la littérature scientifique pour la pièce industrielle étudiée. Le modèle est un modèle prédictif, représenté par des équations polynomiales de degré deux, liant chaque sortie aux entrées. L'application du modèle permettra la validation de l'hypothèse ci-dessus.

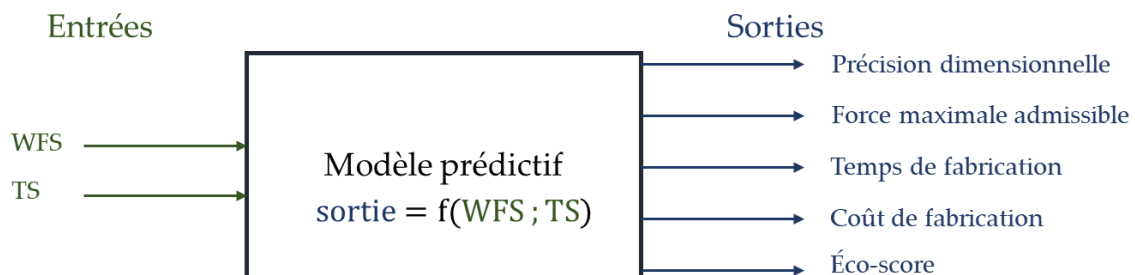


Fig. 3.7. Modèle de performances proposé pour le procédé WAAM-CMT

3.3.2. Méthodologie pour appliquer le modèle de performances

Pour développer ce modèle, nous proposons d'appliquer la méthodologie présentée en Fig. 3.8. au cas d'étude présenté en section 1.4.5. En fonction du plan d'expérience défini, les pièces sont fabriquées selon différents couples de paramètres (WFS ; TS). Puis, les réponses sont **mesurées** en deux temps. Des mesures in situ permettent de quantifier les ressources consommées (matière première apportée, énergie électrique consommée, gaz de protection) et le temps de fabrication. Puis après fabrication, des essais mesurent les caractéristiques mécaniques du matériau fabriqué et les dimensions de chacune des pièces.

Ces mesures permettent ensuite de calculer les **indicateurs de performance** du **modèle prédictif** :

- la **précision dimensionnelle** (par **simulation de nuage de points**) ;
- la **force maximale admissible** (par une méthode de **modélisation par éléments finis**) ;
- le **temps** de fabrication (en exploitant directement les mesures de temps) ;
- le **coût** de fabrication (en calculant l'ensemble des coûts associés à cette fabrication) ;
- l'impact environnemental, sous la forme d'un **éco-score** (par **ACV**).

En appliquant la méthode de surface de réponse aux résultats calculés pour chaque couple (WFS ; TS) du plan d'expériences, la relation entre chaque indicateur de performance et les paramètres de fabrication (WFS et TS) est exprimée sous forme d'une équation polynomiale de degré deux. **Ce système de cinq équations constitue le modèle de performances proposé dans ces travaux.** Enfin, des analyses statistiques sont effectués pour évaluer le modèle obtenu.

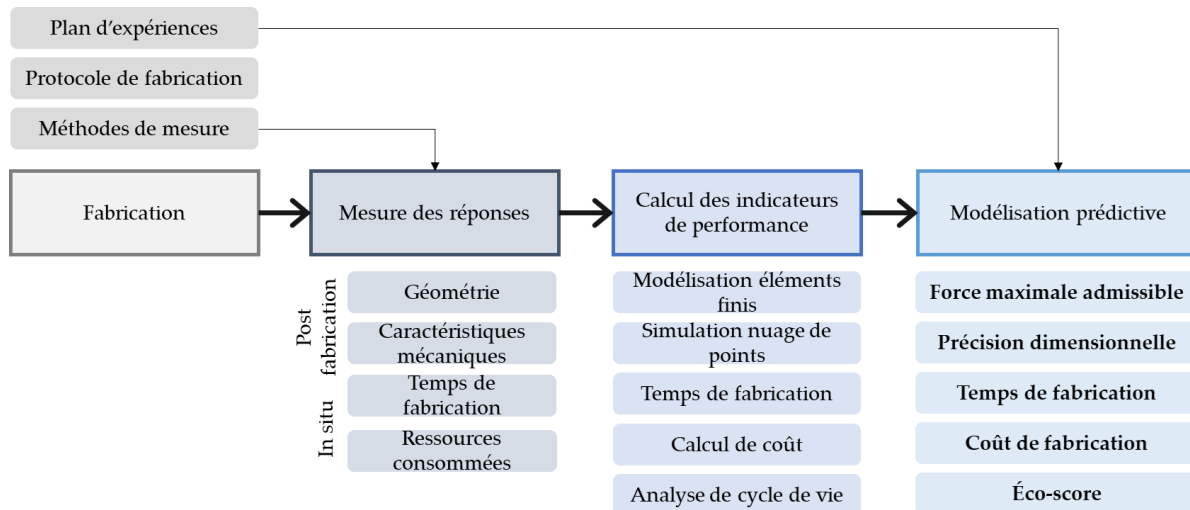


Fig. 3.8. Méthodologie pour le développement du modèle de performances proposé

3.3.3. Conclusion

Ce chapitre présente la définition et la méthodologie de développement du modèle prédictif permettant d'établir les relations entre les performances mécaniques et industrielles durables du procédé WAAM-CMT et les paramètres de fabrication. L'objectif est de pouvoir ensuite choisir les paramètres selon les performances ciblées.

Pour cela, un état de l'art de la mesure des performances des processus de fabrication industriels a été présenté. Il a permis de définir les performances mécaniques et industrielles durables du procédé WAAM-CMT. Les paramètres de fabrication les plus influents sur ces indicateurs ont été identifiés. Les méthodes de calcul des indicateurs de performances ont été explicitées. Enfin, la méthode de caractérisation des relations entre les sorties et les entrées du modèle a été définie.

Ainsi, une méthodologie pour le développement d'un modèle de performances pour la fabrication avec le procédé WAAM-CMT a été définie. Son application fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4.

Modèle de performances pour la fabrication d'un mur en acier 316L

Sommaire

4.1.	Fabrication des murs en acier 316L	79
4.1.1.	Matériels et paramètres de fabrication	79
4.1.2.	Influence de WFS et TS sur la géométrie de cordons	81
4.1.3.	Processus de fabrication	84
4.1.4.	Méthodes de mesure	86
4.2.	Mesure des réponses	87
4.2.1.	Géométrie des pièces fabriquées	88
4.2.2.	Propriétés mécaniques de traction	90
4.2.3.	Temps de fabrication	92
4.2.4.	Ressources consommées	93
4.3.	Calcul des indicateurs de performances	95
4.3.1.	Précision dimensionnelle	95
4.3.2.	Force maximale admissible	96
4.3.3.	Temps de fabrication	97
4.3.4.	Coût de fabrication	97
4.3.5.	Éco-score	99
4.4.	Modélisation prédictive	100
4.4.1.	Précision dimensionnelle	101
4.4.2.	Force maximale admissible	102
4.4.3.	Temps de fabrication	103
4.4.4.	Coût de fabrication	104
4.4.5.	Éco-score	105
4.4.6.	Synthèse du modèle de performances obtenu	105
4.5.	Conclusion	107

Ce chapitre concerne l'étape 2.b du cadre de référence, illustré en Fig. 4.1. Les performances du procédé WAAM-CMT pour la fabrication d'un mur épais en acier 316L sont évaluées et modélisées, à partir du modèle de performances défini au chapitre précédent. Ce chapitre permet d'adresser notre troisième question de recherche :

QR3 : Quelle est l'influence des paramètres de fabrication de premier ordre sur les indicateurs de performances mécaniques et industrielles durables pour une pièce donnée ?

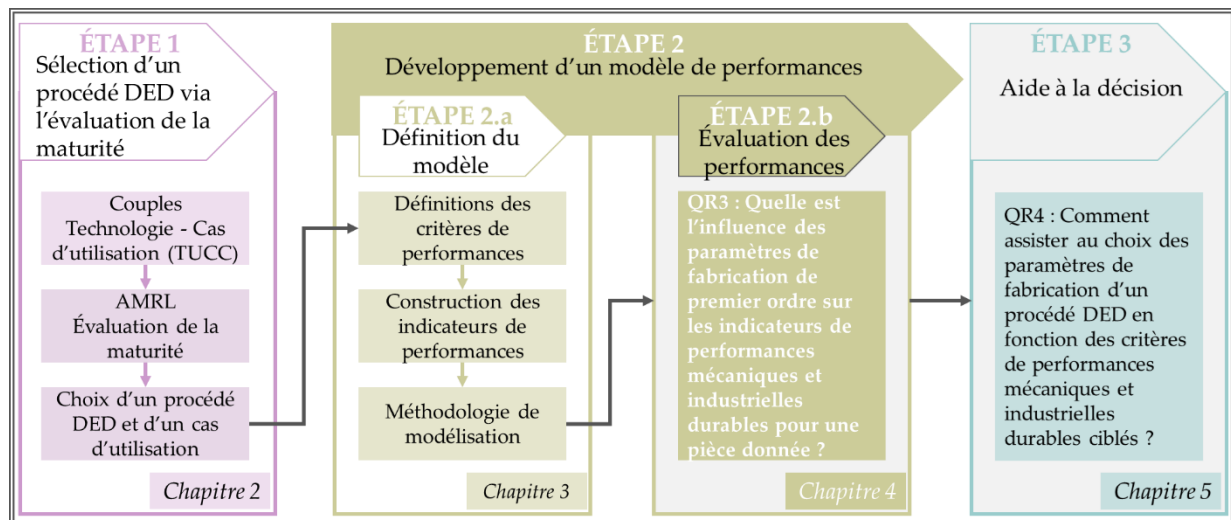


Fig. 4.1. Positionnement du chapitre dans le cadre méthodologique de référence envisagé

Pour y répondre, nous proposons de mener des expérimentations afin de caractériser l'influence des paramètres du premier ordre (WFS et TS) sur les indicateurs de performances mécaniques ($d_{\%}$ et F_{max}) et industrielles durables (t_{fab} , C_{fab} , $Eco - score$) pour la fabrication d'un mur en acier 316L avec le procédé WAAM-CMT, selon la méthodologie présentée en section 3.3.2 (cf. Fig. 3.8). Tout d'abord, les méthodes et le matériel mis en œuvre pour mener ces expérimentations sont présentés en section 0. Puis, en section 4.2, les résultats des mesures des réponses observées sont détaillés. Dans la section 4.3, les indicateurs des performances mécaniques et industrielles durables sont calculés à partir des mesures réalisées. La section 4.4 explicite les relations analytiques issues du modèle permettant de prédire ces performances selon WFS et TS. Enfin, une conclusion est présentée en section 4.5.

4.1. Fabrication des murs en acier 316L

4.1.1. Matériels et paramètres de fabrication

Matériel

La fabrication des murs nécessaires à la réalisation de cette étude a été menée en utilisant le procédé WAAM-CMT de la plateforme technique Addimadour, illustré en Fig. 4.2. Les communications entre le robot et le système WAAM sont assurées par le protocole AB Device Net.

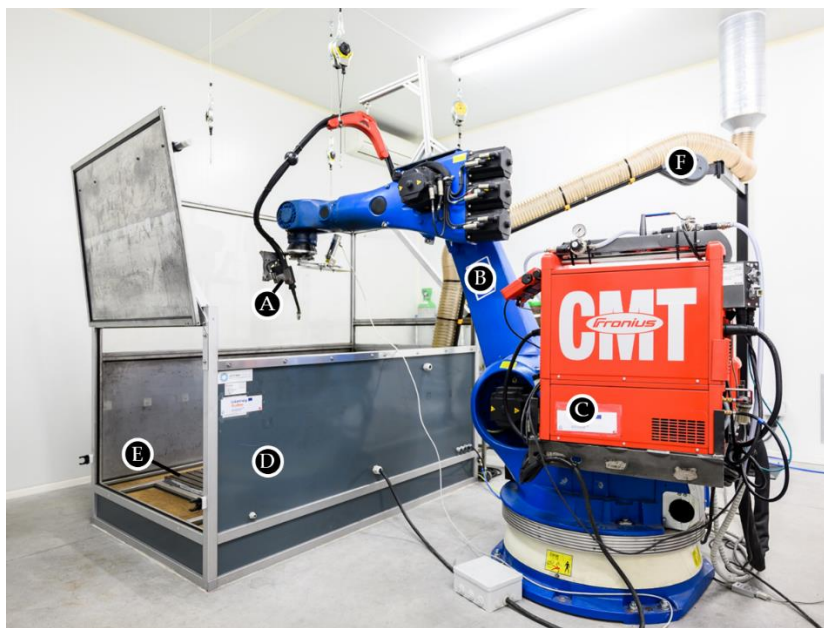


Fig. 4.2. Présentation de la cellule robotisée WAAM

(A) torche de soudage, (B) robot KUKA KR 100 HA 2000, (C) poste de soudage WAAM FRONIUS TransPuls Synergic 3200 CMT, (D) cuve d'inertage, (E) plateau de fabrication, (F) système d'aspiration des fumées

La matière première choisie est un fil d'acier inoxydable 316LSi de 1,2 mm de diamètre, fourni par Selectarc, dont la composition est donnée dans la Table 4.1 [165].

Table 4.1. Composition chimique du fil métallique d'apport

Éléments	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	P	S	Co	N
Composition (%)	0,02	0,85	1,7	18,5	11,5	2,55	0,10	0,01	0,02	0,01	0,06	0,06

Paramètres de fabrication du premier ordre

La Table 4.2 présente le plan d'expériences factoriel complet, permettant de caractériser l'influence de WFS et TS sur les cinq indicateurs de performance. Chaque paramètre prend trois niveaux, **neuf combinaisons** composent donc ce plan d'expériences. Les valeurs limites

de WFS et TS, assurant la fabricabilité, ont été déterminées selon l'**expérience métier** de l'ingénieur procédé en charge du WAAM-CMT sur la plateforme Addimadour.

Table 4.2. Plan d'expériences factoriel complet

		WFS	TS
Référence mur	(a)	-1	-1
	(b)	0	-1
	(c)	1	-1
	(d)	-1	0
	(e)	0	0
	(f)	1	0
	(g)	-1	1
	(h)	0	1
	(i)	1	1
Niveau	-1	5,0 m/min	0,60 m/min
	0	7,5 m/min	0,75 m/min
	1	10 m/min	0,90 m/min

Paramètres de fabrication du second ordre

Les paramètres du second ordre, i.e. les autres paramètres de fabrication, sont fixés afin de ne pas parasiter l'analyse des effets de WFS et TS. Ils ont été présentés en section 1.4.2. Leurs valeurs ont été déterminées à partir de la littérature [26,166] et de l'expertise métier recueillie sur la plateforme Addimadour. La Table 4.3 présente ces valeurs. Nous avons privilégié le choix de **fixer la température inter-couche**. Ainsi, l'influence directe de WFS et TS sur la microstructure du matériau fabriqué sera mise en évidence via l'apport de chaleur uniquement (et non par l'augmentation progressive de la température inter-couche). La température inter-couche fixée à 400 °C pendant le processus de fabrication permet d'assurer la fabricabilité des blocs. En effet, une température trop élevée favorise un écroulement des couches supérieures.

Table 4.3. Paramètres relatifs au procédé et à la stratégie de fabrication

Paramètres	Gaz de protection	Mison 2 (Ar + 2% CO ₂ + 0,03% NO)
	Débit du gaz	17 L/min
	Loi synergique	CMT 1627 - base 0979
	Stick out	15 mm
	Température inter-couche	400°C
Stratégie	Hauteur x Épaisseur x Longueur	160 mm x 25 mm x 180 mm
	Trajectoire	Triangulaire – bidirectionnelle
	Amplitude	25 mm

La stratégie de fabrication a été définie selon le mur fabriqué comme illustré en Fig. 4.3. Les dimensions du mur sont données en Fig. 4.3.a. La trajectoire de déposition choisie est une trajectoire triangulaire bidirectionnelle. Cette trajectoire est caractérisée par son amplitude et

sa période comme illustrées sur la Fig. 4.3.b. Une couche sur deux, le robot parcourt la trajectoire dans le sens des x positifs. Puis, il parcourt cette même trajectoire en sens inverse.

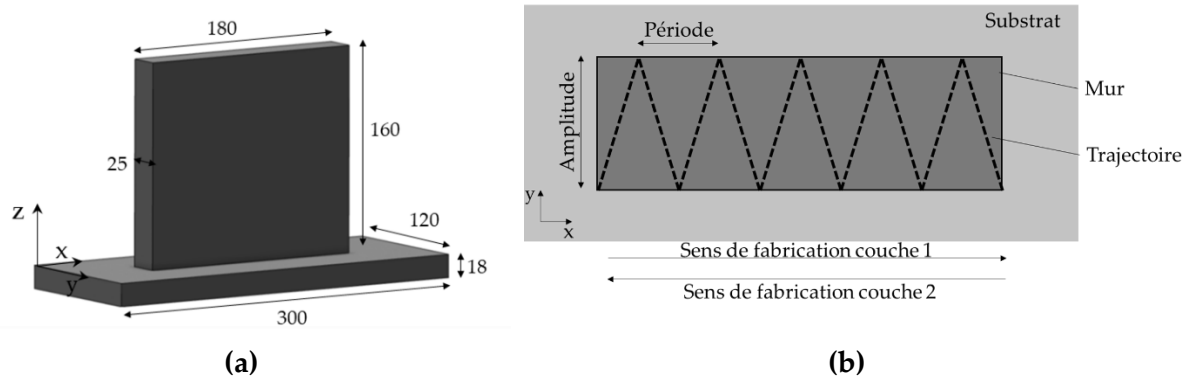


Fig. 4.3. Dimensions du mur et trajectoire de fabrication en vue isométrique (a) et vue de dessus (b)

L'amplitude est déterminée par l'épaisseur de la pièce à fabriquer, ici 25 mm. La période est calculée selon la géométrie des cordons fabriqués, qui dépend des paramètres de fabrication de premier ordre, WFS et TS.

4.1.2. Influence de WFS et TS sur la géométrie de cordons

La fabrication d'une couche doit assurer qu'elle soit correctement remplie, **sans manque de fusion, et la plus plate possible**, pour ne pas créer de déformation géométrique couche après couche. Pour cela, la période de la trajectoire doit être définie pour assurer un empilement correct des couches. La période de la trajectoire est liée au **taux de recouvrement**. Un taux de recouvrement trop faible conduit à un écart trop important entre deux cordons, favorisant un manque de matière à la jonction des deux. Au contraire, avec un taux de recouvrement trop élevé, un défaut de hauteur est observé : un cordon se superpose sur l'autre [70,167,168].

Le taux de recouvrement, r , dépend de l'écart entre deux cordons fabriqués côte à côte, comme représentés en Fig. 4.4. La géométrie des cordons est caractérisée par leur largeur moyenne w et leurs hauteurs respectives $h1$ et $h2$. Le second cordon est déposé à une distance d (par rapport aux centres des deux cordons) du premier cordon. Le taux de recouvrement représente la distance du cordon sur lequel le cordon suivant sera superposé.

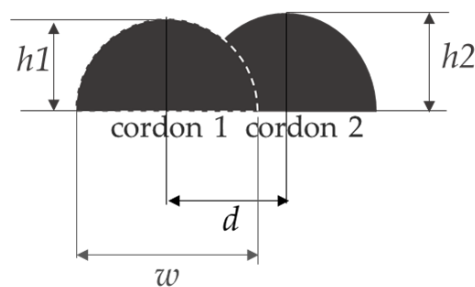


Fig. 4.4. Schématisation du phénomène de recouvrement

L'équation 4.1 donne le taux de recouvrement, r exprimé en %, en fonction de w et d .

$$r = \frac{w - d}{w} \times 100 \quad (4.1)$$

La distance d correspond à la période de la trajectoire définie en Fig. 4.3.b. L'équation 4.1 devient alors :

$$d = w \times \left(1 - \frac{r}{100}\right) \quad (4.2)$$

D'après l'équation 4.2, pour déterminer la valeur optimale d , il faut déterminer les valeurs w et r , pour chaque couple de paramètres (WFS ; TS). Or, w est déjà connu pour ces couples (WFS ; TS) par l'expertise de la plateforme Addimadour.

Ainsi, **pour trouver la valeur optimale de la période d** , cinq valeurs de taux de recouvrement r (20%, 25%, 30%, 35% et 40%) sont testées pour chacun des neuf couples (WFS ; TS). Pour chaque couple (WFS ; TS) et pour chaque taux de recouvrement r , une paire de cordons est déposée sur le substrat, comme illustré en Fig. 4.5.

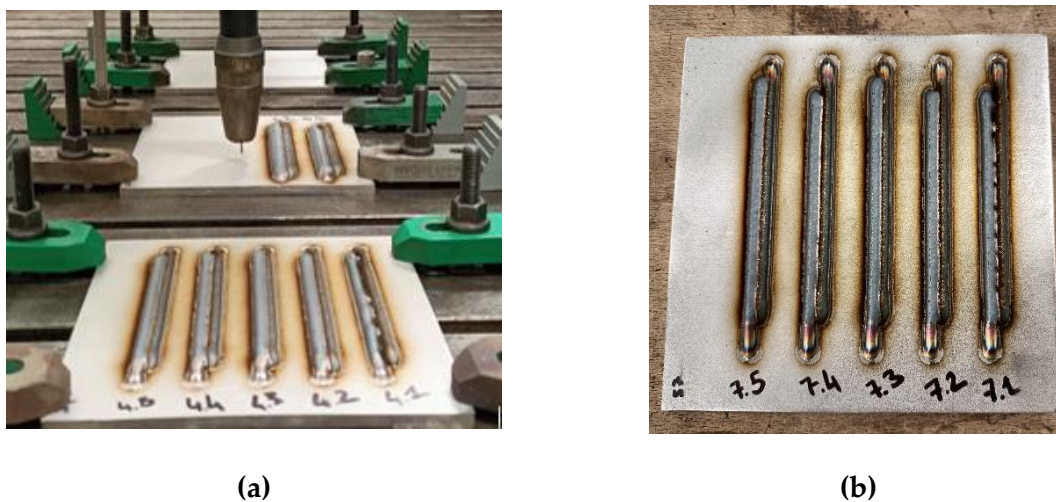


Fig. 4.5. Fabrication des cordons selon les paramètres : (a) WFS = 5 m/min et TS = 0.6 m/min et (b) WFS = 7.5m/min et TS = 0.75 m/min.

Afin de quantifier le taux de recouvrement, le profil de recouvrement est observé au microscope. Pour cela, chaque couple de cordon est découpé en son milieu au moyen d'une meule de tronçonnage STRUERS 30A25 monté sur une tronçonneuse STRUERS Labotom 5. Puis, les échantillons sont polis miroirs selon le cycle présenté en Annexe 4.A. Les échantillons sont observés à l'aide d'un microscope optique Leica DM1750M avec un objectif ($\times 2.5$) et analysés avec la suite logiciel LAS v14.2.

La Fig. 4.6 présente un exemple de profil de recouvrement. Pour les quarante-cinq couples de cordons fabriqués, l'analyse des coupes micrographiques est réalisée via le logiciel imageJ. Elle permet de mesurer :

- la hauteur de chacun des cordons, h_1 et h_2 , donnant lieu au calcul de $\Delta h = |h_2 - h_1|$;

- l'aire critique, A , délimitée par les sommets de chaque cordon, en vert sur la Fig. 4.6.

L'ensemble des mesures réalisées est détaillé en Annexe 4.B.

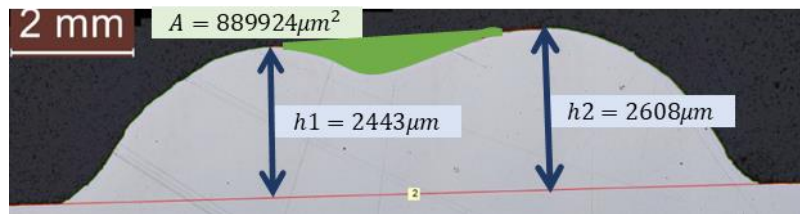


Fig. 4.6. Profil de recouvrement (WFS = 10 m/min ; TS = 0.9 m/min ; $r = 25\%$) et mesures réalisées

Δh et A sont relevées pour chacun des couples (WFS ; TS), en fonction de r . Puis, Δh et A sont approximées par des courbes de tendance polynomiales de degré deux, comme illustré en Fig. 4.7.

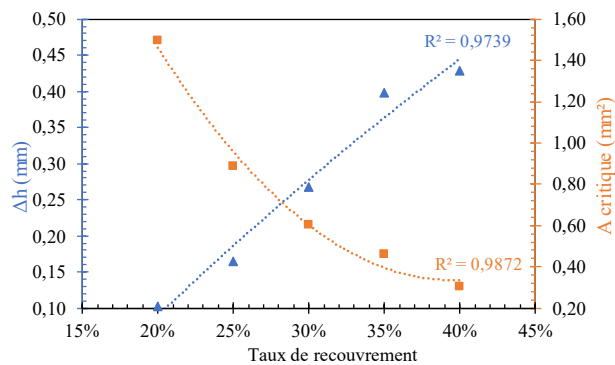


Fig. 4.7. Recherche du taux de recouvrement optimal pour WFS = 10 m/min ; TS = 0.9 m/min

Le taux de recouvrement optimal correspond à une différence de hauteur et à une aire critique minimale entre les deux cordons fabriqués [70]. Ainsi, la minimisation des deux indicateurs revient à résoudre $\min(f(x)=f(y))$. Graphiquement, cela équivaut à l'abscisse qui correspond au croisement entre les deux courbes. Le taux de recouvrement obtenu graphiquement, est arrondi au multiple de 5 connu le plus proche.

Les taux de recouvrement obtenus pour les neuf couples (WFS ; TS) et les largeurs de cordons sont présentés en Table 4.4. Par l'équation 4.2, on obtient d . Pour des apports de chaleur plus importants, par exemple pour les pièces (b) et (c), le taux de recouvrement obtenu est le plus faible (25%).

Basé sur l'expertise du procédé au sein de la plateforme, l'homogénéité des valeurs mesurées sur toute la longueur du cordon n'a pas été contrôlée. L'évaluation de la variation des valeurs obtenues dans cette pré-étude pourrait être réalisée en augmentant le nombre de mesures pour chaque échantillon.

Table 4.4. Propriétés géométriques des cordons en fonction de WFS et TS

Réf pièce	WFS m/min	TS m/min	w mm	r %	d mm
(a)	5	0,60	5,1	30	3,6
(b)	7,5	0,60	7,0	25	5,2
(c)	10	0,60	8,0	25	6,0
(d)	5	0,75	4,5	30	3,2
(e)	7,5	0,75	6,5	30	4,5
(f)	10	0,75	7,8	30	5,4
(g)	5	0,90	4,1	30	2,9
(h)	7,5	0,90	5,8	30	4,1
(i)	10	0,90	6,1	30	4,3

4.1.3. Processus de fabrication

Fabrication additive des murs

Le dispositif expérimental employé pour la fabrication des murs en acier 316L est présenté en Fig. 4.8.

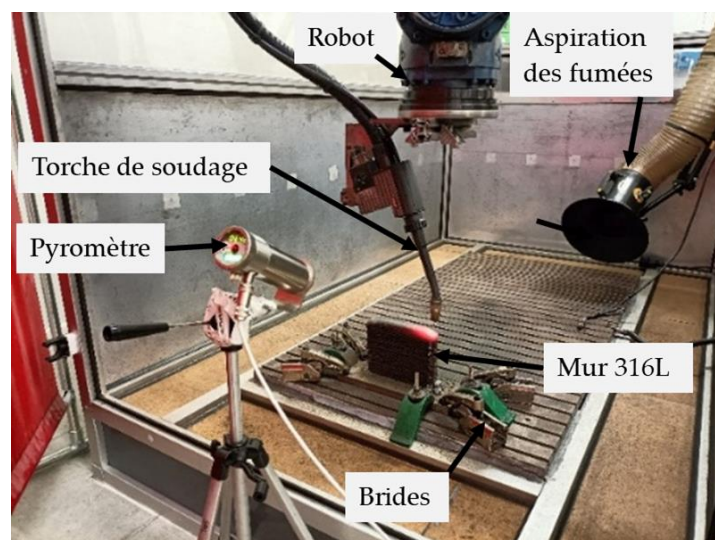


Fig. 4.8. Dispositif expérimental

Pour assurer la hauteur finale du mur, la hauteur après le dépôt de chaque couche est mesurée au centre de la pièce avec un pied à coulisse. Pour s'assurer de la pertinence de la valeur obtenue pour la hauteur, trois mesures ont été réalisées et la valeur moyenne a été retenue. Lorsque la hauteur mesurée dépasse la hauteur visée (160 mm), la fabrication est arrêtée. Un pyromètre est utilisé pour contrôler la température inter-couche. La température est mesurée au milieu de la couche supérieure. Lorsque la température mesurée est inférieure à 400°C, le

pyromètre est déplacé pour cibler la couche suivante et la fabrication de la nouvelle couche est lancée.

L'ensemble des manipulations requises pour la fabrication des neuf murs du plan d'expériences a été défini par un protocole expérimental renseigné en Annexe 4.C. Les paramètres de fabrication variables des neuf pièces sont synthétisés dans la Table 4.5.

Table 4.5. Paramètres nominaux de premier et second ordres

Ref pièce	WFS m/min	TS m/min	U V	I A	e_i J/mm	Période de balayage mm
(a)	5	0,60	12,5	165	165	3,6
(b)	7,5	0,60	13,4	219	234	5,2
(c)	10	0,60	14,0	260	291	6,0
(d)	5	0,75	12,5	165	132	3,2
(e)	7,5	0,75	13,4	219	188	4,5
(f)	10	0,75	14,0	260	233	5,4
(g)	5	0,90	12,5	165	110	2,9
(h)	7,5	0,90	13,4	219	157	4,1
(i)	10	0,90	14,0	260	194	4,3

Post-traitement

Un traitement thermique a été appliqué à chaque pièce produite (4 heures à 500 °C avec des phases de chauffage et de refroidissement de 50 °C/h) afin d'**éliminer les contraintes résiduelles** sans modifier de manière significative les propriétés mécaniques du matériau fabriqué [169,170]. Ces opérations sont réalisées avec un four sous vide Xinkyu (xinyu Sa2-16-17TP) de 16 L.

Après le traitement thermique, différentes éprouvettes nécessaires à la caractérisation ont été extraites des murs. Leur localisation dans le mur est précisée sur la Fig. 4.9. Localisation des éprouvettes en vue isométrique (a) et de coupe avec cotations en mm (b). Le plan complet des murs est donné en Annexe 4.D.

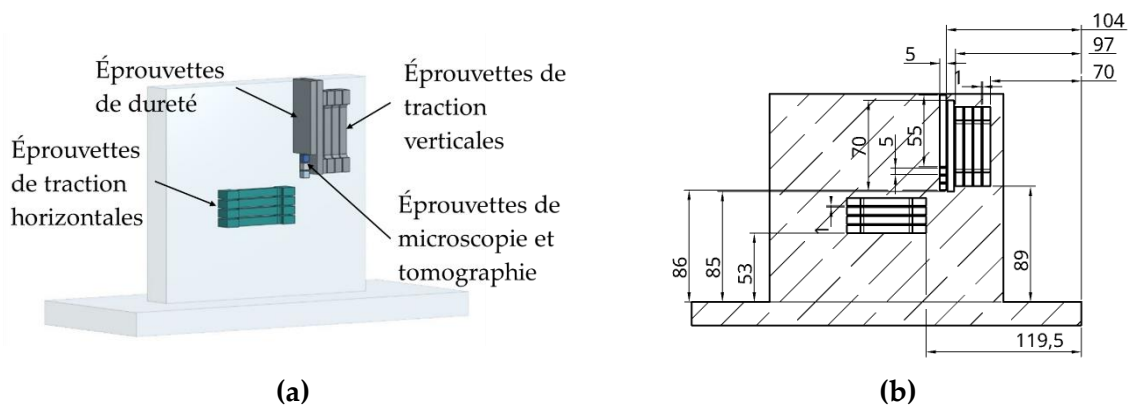


Fig. 4.9. Localisation des éprouvettes en vue isométrique (a) et de coupe avec cotations en mm (b)

Les dimensions des éprouvettes de traction sont données en Fig. 4.10. Pour la caractérisation en traction, deux orientations d'éprouvettes (verticale et horizontale) ont été définies pour vérifier l'isotropie du matériau fabriqué. Pour chaque orientation, quatre éprouvettes ont été usinées pour chaque pièce, afin d'assurer la répétabilité des essais. Une éprouvette de chaque direction a été prélevée pour contrôler leur rugosité.

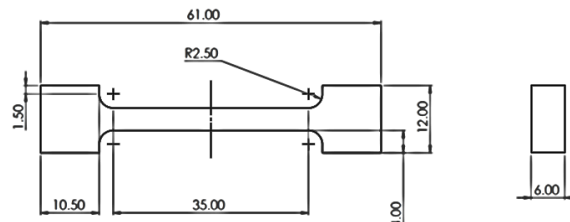


Fig. 4.10. Dimensions des éprouvettes de traction

L'extraction des éprouvettes a été réalisée avec une machine d'électroérosion immergée à fil (Excetec V650G) et une machine d'usinage cinq axes (Hurco VMX42HSRTi). Les éprouvettes de traction obtenues présentent une rugosité $Ra = 3,23 \pm 0,51 \mu m$.

4.1.4. Méthodes de mesure

Géométrie et précision dimensionnelle

Les murs fabriqués ont été scannés à l'aide du bras robot Faro, doté de la technologie sans contact Laser Line Probe, le laser étant piloté par le logiciel Faro Cam2. À partir des pièces scannées par balayage laser, les nuages de points obtenus ont été chargés dans le logiciel Cloudsoftware. Puis la distance point à point entre chaque pièce scannée et la CAO originale a été mesurée via le logiciel. Ainsi, la précision dimensionnelle, $d\%$, a été calculée pour chaque pièce (cf. section 3.2.1).

Propriétés de traction et force maximale admissible

Cinquante-quatre éprouvettes ont été soumises à des essais de traction quasi-statique à température ambiante. Les essais de traction ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essai universelle Zwick Roell Z1474 d'une capacité de charge maximale de 100 kN. Avant de procéder aux expériences, l'équipement a été étalonné et validé conformément à la norme BSENISO 7500-1 (O 7500-1:2018 - Metalli, 2018). Pour garantir une déformation quasi-statique, comme le prévoit la norme ISO 6892-1:2019(E) [171], les éprouvettes ont été sollicitées jusqu'à la rupture à une vitesse de **0,63 mm/min**. L'analyse de la déformation au-delà de la limite élastique permet d'analyser les modes de rupture et le comportement global du matériau. Pour relever la déformation fine autour de la zone d'élasticité, **un extensomètre de cinq millimètres** (Epsilon-3442-005M-02-ST) a été fixé sur chacune des éprouvettes, comme le montre la Fig. 4.11. Les propriétés du matériau sont ainsi identifiées (cf. section 3.2.2) : module d'élasticité (E), déformation à rupture (A%), limite d'élasticité ($R_{e0,2}$) et résistance mécanique (R_m).

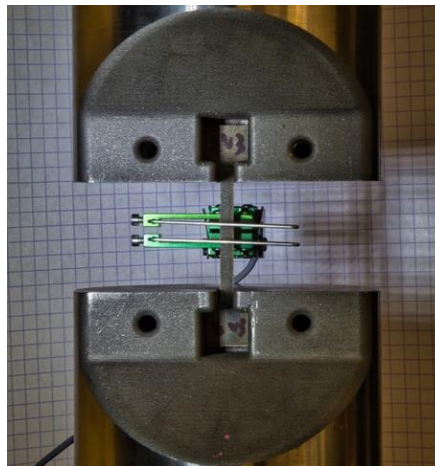


Fig. 4.11. Essai de traction sur une éprouvette équipée d'un extensomètre

La force maximale admissible est calculée à partir des propriétés du matériau comme défini en section 3.2.2. L'Annexe 4.E détaille la méthode de calculs sous Ansys (MEF).

Temps de fabrication

Le **temps de fabrication** est mesuré entre le démarrage de la première couche et la fin de la dernière couche. Le temps de soudage est estimé grâce au logiciel du robot avec une précision de l'ordre de la seconde (ce qui est adéquat pour des temps de fabrication de plus d'une heure).

Ressources consommées

Les ressources consommées sont le **fil métallique**, le **gaz de protection** et l'**énergie électrique**. La bobine de fil est pesée avant et après la fabrication pour déterminer la quantité de fil utilisé. Le substrat est pesé avant la fabrication et l'ensemble (pièce et substrat) est pesé après la fabrication pour mesurer la quantité de matière utilisée à l'aide d'une balance Kern FCB de précision 2 g. La quantité de gaz de protection utilisé est mesurée grâce au logiciel Fronius. Pour la consommation électrique, un wattmètre (Chauvin-Arnoux PEL 103) est directement branché sur le tableau électrique de la cellule de fabrication. L'énergie électrique consommée par l'ensemble de la cellule de fabrication est ainsi mesurée selon la puissance active consommée, en Watts. La précision de la mesure est de l'ordre du Watt.

4.2. Mesure des réponses

Les mesures réalisées durant et après la fabrication sont présentées et discutées dans cette section. La Table 4.6 présente les paramètres du premier et du second ordres réels moyens, c'est-à-dire la moyenne, pour chaque pièce, des mesures des paramètres réellement délivrés par la machine. En les comparant avec les paramètres de consigne, précédemment présentés en Table 4.5, **certaines écarts sont constatés**. Globalement, la valeur réelle de WFS varie autour des valeurs de consignes, mais la vitesse de 10 m/min a été la plus compliquée à atteindre en moyenne. Cela peut indiquer une variation proportionnelle à la valeur de consigne, liée à la

loi synergique qui détermine les valeurs réelles du CMT. **Malgré ces variations, la différenciation choisie pour le plan d'expériences est respectée.** La mesure réelle de TS n'est pas disponible avec les moyens à notre disposition. Aussi le e_i estimé dépend uniquement de U et de I . L'apport d'énergie est inférieur de 7% en moyenne aux valeurs de consigne demandées, de manière homogène pour les différentes paramétries. Ainsi, **il apparaît que les résultats et la modélisation présentés ci-après ne sont pas impactés par la variation des valeurs entre la consigne et le réel.**

Table 4.6. Paramètres du premier et second ordres mesurés et estimés

Ref pièce	Paramètres réels mesurés					Paramètres estimés
	WFS (moy) m/min	U (moy) V	I (moy) A	Nbr de couches	Hauteur de couche moy mm	e_i J/mm
(a)	5,6 ± 0,6	11,9 ± 0,8	159,2 ± 5,5	31	5,2 ± 0,6	151,6 ± 11,5
(b)	8,0 ± 1,3	13,4 ± 1,5	205,8 ± 8,7	35	4,7 ± 0,3	220,6 ± 26,4
(c)	9,7 ± 1,7	15,9 ± 1,6	218,5 ± 14,6	38	4,3 ± 0,6	277,9 ± 28,6
(d)	5,3 ± 0,5	11,5 ± 0,6	159,8 ± 2,3	34	4,8 ± 0,6	117,6 ± 6,4
(e)	8,3 ± 1,4	13,7 ± 1,5	209,5 ± 8,5	37	4,4 ± 0,7	183,7 ± 21,4
(f)	9,2 ± 1,3	14,0 ± 1,5	229,1 ± 15,7	46	3,5 ± 1	205,3 ± 22,6
(g)	5,2 ± 0,6	11,6 ± 0,6	158,7 ± 4,8	35	4,7 ± 0,5	98,2 ± 5,9
(h)	7,8 ± 0,9	13,2 ± 0,9	210,3 ± 8,4	38	4,3 ± 0,8	148,1 ± 11,7
(i)	8,7 ± 1,3	14,9 ± 1,3	226,4 ± 14,5	40	4,0 ± 0,6	179,9 ± 16,1

4.2.1. Géométrie des pièces fabriquées

Au total, neuf murs ont été fabriqués selon les différentes combinaisons de WFS et TS conduisant à différents apports d'énergie. Les dimensions des neuf pièces fabriquées sont mesurées et présentées en Table 4.7.

Ces mesures montrent des tendances selon l'apport d'énergie pour la géométrie des pièces fabriquées :

- pour des valeurs de e_i faibles (par exemple, les pièces (d) et (g)), les couches sont plus hautes et les épaisseurs de murs sont plus faibles. Cela se traduit également par des longueurs et épaisseurs de murs plus proches des géométries désirées.
- à l'inverse, pour des valeurs de e_i élevées (par exemple, les pièces (b) et (c)), l'épaisseur du mur et sa largeur sont plus élevées.

Table 4.7 Mesures des dimensions des pièces fabriquées

Ref pièce	e_i J/mm	Hauteur moyenne mm	Longueur moyenne mm	Épaisseur moyenne mm	Hauteur de couche moyenne (mm)
(a)	165	161,2 ± 0,6	181,9 ± 2,2	28,6 ± 0,3	5,2 ± 0,6
(b)	234	158,2 ± 5,0	183,7 ± 1,4	30,7 ± 1,2	4,7 ± 0,3
(c)	291	160,7 ± 5,0	187,1 ± 3,6	32,0 ± 0,2	4,3 ± 0,6
(d)	132	162,8 ± 0,2	181,1 ± 0,5	26,5 ± 0,3	4,8 ± 0,6
(e)	188	158,0 ± 3,4	183,4 ± 2,3	29,9 ± 0,6	4,4 ± 0,7
(f)	233	160,2 ± 0,7	182,2 ± 1,9	30,4 ± 0,3	3,5 ± 1,0
(g)	110	163,1 ± 0,4	179,5 ± 1,6	25,6 ± 1,0	4,7 ± 0,5
(h)	157	160,1 ± 0,4	181,1 ± 0,9	27,6 ± 0,7	4,3 ± 0,8
(i)	194	159,1 ± 0,8	181,3 ± 0,5	30,8 ± 1,0	4,0 ± 0,6

Il semblerait donc qu'un apport d'énergie plus faible améliore la précision géométrique des pièces fabriquées.

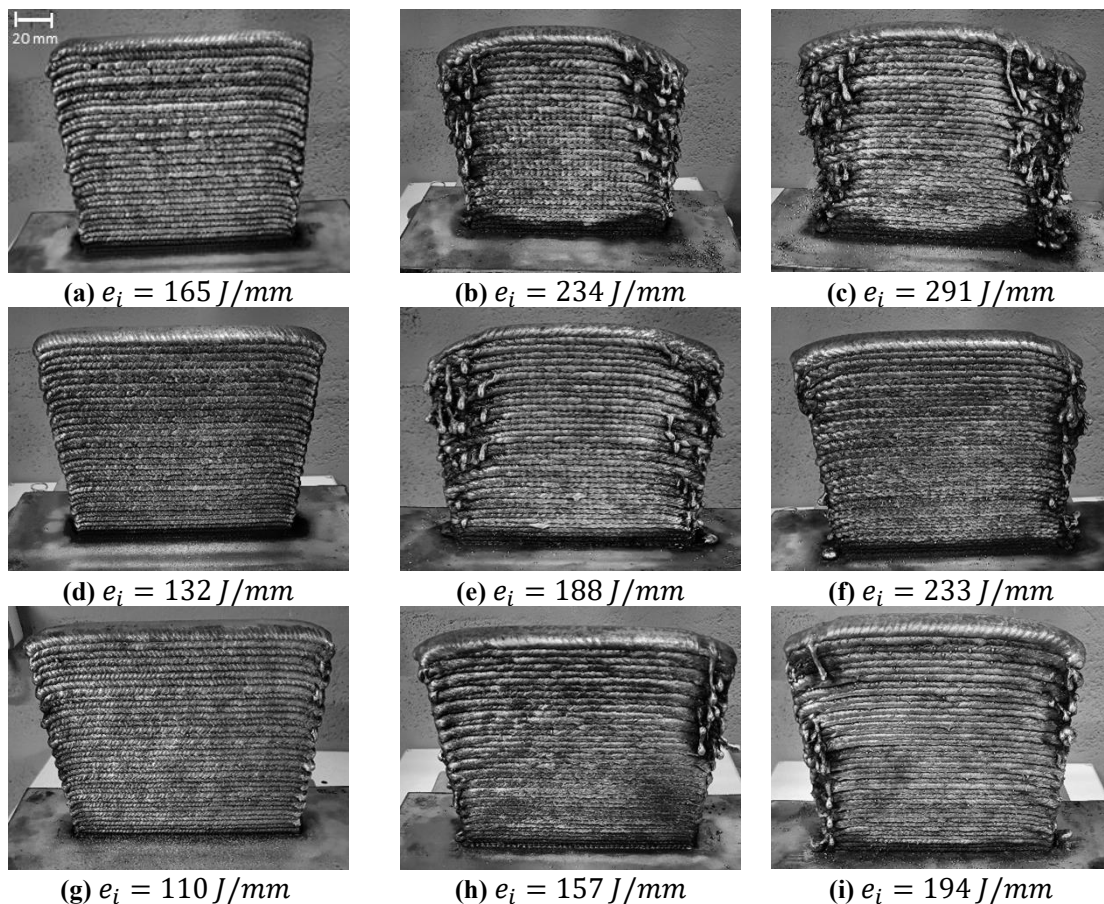


Fig. 4.12. Photographies des neuf murs fabriqués selon les paramètres spécifiés dans la Table 4.5.

L'effet des paramètres de fabrication sur la morphologie finale des murs fabriqués est illustré en Fig. 4.12. Un WFS plus faible permet d'obtenir une géométrie plus proche de la géométrie

désirée pour les murs (a), (d) et (g). Cela confirme qu'un **apport de chaleur plus faible, induit par une valeur de WFS plus faible, favorise la fabrication de pièces sans défauts géométriques visuellement apparents** [172].

Les principaux défauts géométriques visuellement apparents sont principalement dus à l'apport d'énergie élevé qui provoque des projections et l'effondrement des bords [19], comme le montrent les murs (b), (c) et (e). Bien que ces phénomènes soient présents dans une moindre mesure sur les pièces (f), (h) et (i), ils sont particulièrement évidents sur les murs (b), (c) et (e). L'effondrement des bords dans le WAAM est principalement dû à une chaleur excessive lors du dépôt d'une nouvelle couche sur la précédente [69]. Ce phénomène donne lieu à des bords arqués, dont la cambrure est amplifiée par le nombre de couches, provoquant une variation de la hauteur totale entre les bords et le centre.

4.2.2. Propriétés mécaniques de traction

L'ensemble des résultats des essais de traction est porté en Annexe 4.F. Les courbes contrainte-déformation (σ - ϵ), pour les éprouvettes verticales et horizontales, sont tracées sur les Fig. 4.13(a) et Fig. 4.13(b) respectivement.

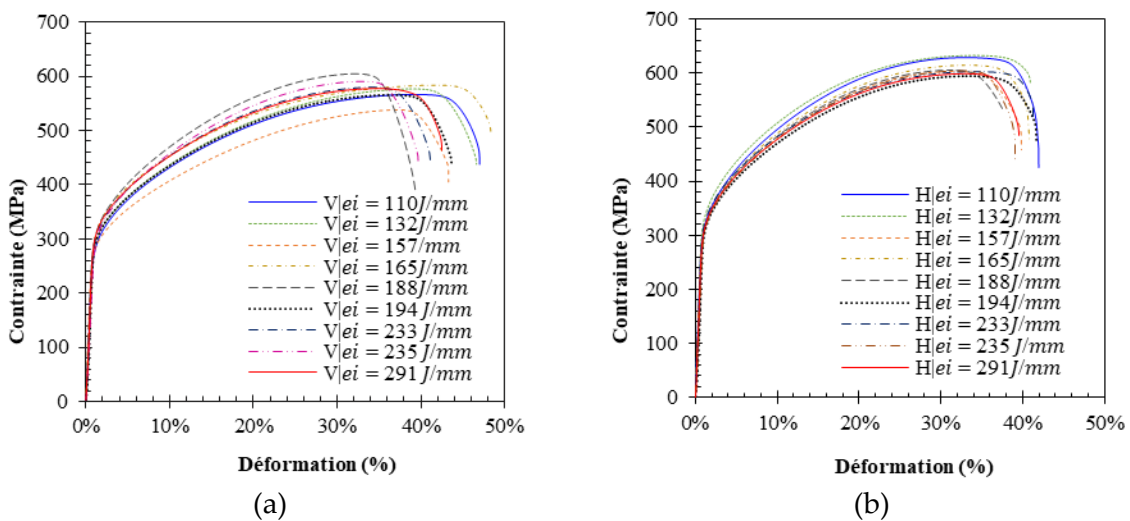


Fig. 4.13. Courbes contrainte-déformation des éprouvettes de traction en fonction de e_i et de la direction avec : (a) les échantillons verticaux et (b) les échantillons horizontaux

En comparant les données selon l'orientation de la construction pour chaque pièce, aucune différence significative n'a été observée ce qui indique un **comportement isotrope du matériau**. Des études comparatives menées par Müller *et al.* [149], Sun *et al.* [173] et Cunningham *et al.* [79] ont constaté une anisotropie lors de la fabrication d'acier par le procédé WAAM. En général, la variation des propriétés mécaniques entre les différentes directions d'impression est attribuée à un refroidissement inter-couche hétérogène qui provoque une microstructure hétéroclite, et une distribution non-uniforme des déformations. Cependant, nos résultats, révélant l'isotropie du matériau, peuvent être dus à :

- l'impression de pièces plus épaisses et à des niveaux d'apport d'énergie plus faibles ;

- une température inter-couche fixée à 400°C ;
- le traitement thermique appliqué.

Les valeurs minimales, maximales et moyennes des propriétés mécaniques du matériau 316L imprimé sont synthétisées dans la Table 4.8.

Table 4.8. Valeurs des propriétés de traction obtenues expérimentalement

		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
E	(GPa)	104	155	136	20
$R_{e0.2}$	(MPa)	284	314	298	14
R_m	(MPa)	576	605	593	23
A	%	38	43	41	3,3

Le module d'élasticité obtenu expérimentalement est cohérent avec les résultats obtenus pour des pièces plus fines [79]. En ce qui concerne la limite d'élasticité et la résistance mécanique, les valeurs expérimentales sont supérieures aux standards requis dans l'industrie. Ces observations sont également en accord avec la littérature (cf. section 3.1.3) sur des pièces fines fabriquées pour des apports d'énergie supérieurs ou égaux. Les valeurs de A% indiquent un matériau ductile ce qui est cohérent avec la fabrication d'un acier austénitique. Le comportement le plus ductile est atteint à 44%, pour deux murs fabriqués avec les deux valeurs de e_i les plus faibles (110 et 132 J/mm).

La relation entre les propriétés mécaniques (E, A%, $R_{e0.2}$ et R_m) des murs fabriqués en WAAM et l'apport d'énergie dépend de la vitesse du fil et de la vitesse de la torche. Ces aspects ont été quantifiés et explorés en détail dans un article [174].

Table 4.9. Comparaison des caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable 316L fabriqué selon différents procédés

Procédé	R_m (MPa)	$R_{e0.2}$ (MPa)	E (GPa)	A%	Ref
Fonderie	552	262	-	40%	[175]
Forge	525-623	255-310	-	30%	[176]
Standard industriel	450	170	190	40%	[151]
WAAM	533 ± 23	235 ± 6	-	48% ± 2%	[151]
WAAM	550 ± 6	418	-	-	[152]
WAAM	549-582	297-330	112 -192	35%-47%	[79]
WAAM-CMT	593 ± 23	298 ± 14	136 ± 20	41% ± 3	notre étude

Les propriétés expérimentales du 316L fabriqué sont comparées aux valeurs rencontrées dans la littérature dans la Table 4.9. La limite d'élasticité et la résistance mécanique du 316L fabriqué par WAAM sont supérieures à celles du matériau fabriqué de manière conventionnelle. Les

données sur le module d'élasticité du matériau fabriqué par WAAM sont rares dans la littérature, mais la comparaison avec les exigences de l'industrie suggère que les pièces fabriquées par WAAM ont un module élastique inférieur d'environ 20%.

4.2.3. Temps de fabrication

Dans notre étude, le temps de fabrication est défini comme la somme du temps de soudage, de chaque couche (cf. section 3.2.3). Avant de considérer cet indicateur, le temps de soudage et le temps de refroidissement sont reportés en Fig. 4.14 pour les neuf pièces de l'étude.

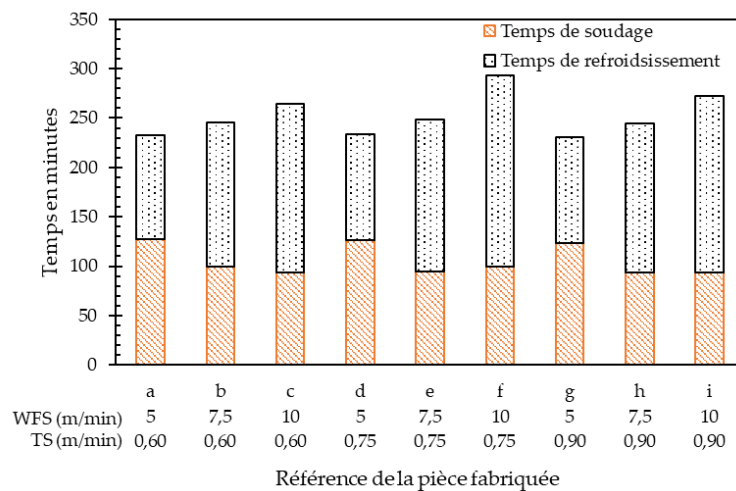


Fig. 4.14. Temps de soudage et de refroidissement des pièces fabriquées

Cette figure montre que le temps de soudage décroît lorsque WFS augmente (de (a) à (c), de (d) à (f), de (h) à (i)). Cela s'explique par le fait que pour des WFS plus élevés, les périodes de la trajectoire de fabrication sont plus élevées.

À l'inverse, le temps de refroidissement augmente lorsque WFS augmente. En effet avec un apport de chaleur plus important, la pièce met plus de temps à atteindre la température inter-couche fixée.

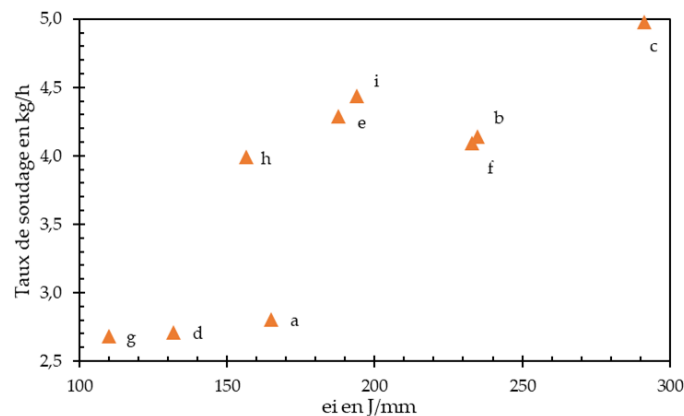


Fig. 4.15. Taux de soudage en fonction de l'apport d'énergie

Pour les pièces fabriquées, le temps de soudage dicte le taux de soudage. Ce taux est présenté en Fig. 4.15. Selon les paramètres utilisés, il varie entre 2,6 et 5 kg/h ce qui est légèrement supérieur aux études similaires pour le CMT, et en ligne avec les attentes industrielles [24]. Aucune relation n'est observée entre le taux de soudage et l'apport d'énergie observée.

4.2.4. Ressources consommées

Matière première

La consommation de matière première est définie comme la différence de masse de la bobine de fil mesurée entre le début et la fin de la fabrication d'un mur (cf. protocole en Annexe 4.C). Elle est représentée pour les neuf murs en Fig. 4.16. Le ratio matière, représenté en Fig. 4.17, est le rapport entre la masse de matière première utilisée, divisé par la masse de la pièce sortie de la cellule de fabrication.

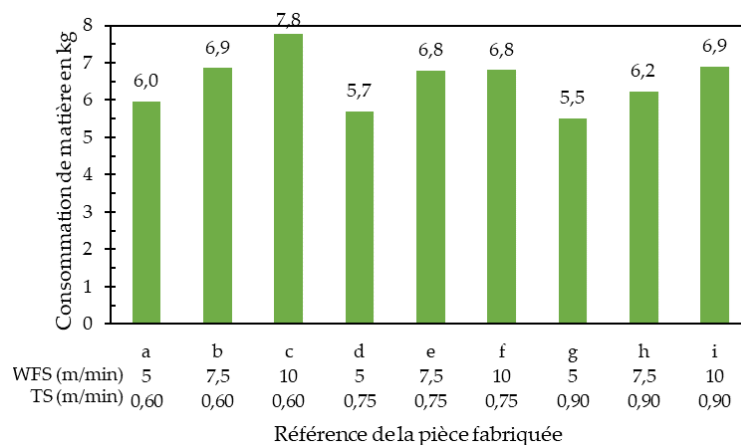


Fig. 4.16. Consommation de matière première pour les pièces fabriquées

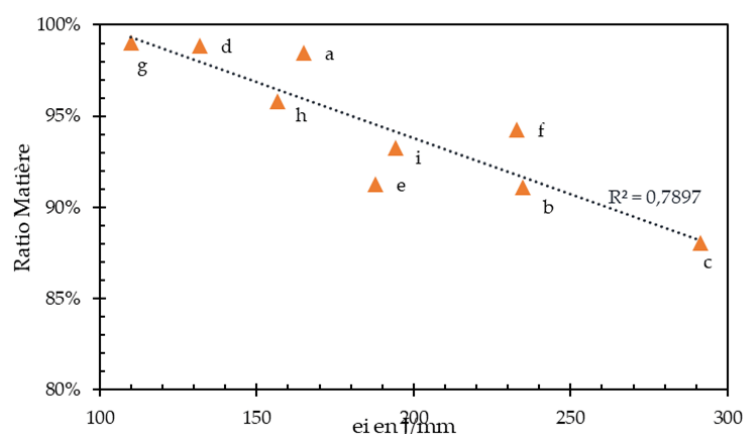


Fig. 4.17. Ratio matière selon l'apport d'énergie

Pour un TS donné, une augmentation de la consommation de matière est observée. Le ratio matière, quant à lui, décroît de manière linéaire avec l'augmentation de l'apport de chaleur. Les principales causes de pertes matières sont les projections et les coulées de matière principalement dues à une instabilité de l'arc, caractéristique d'un apport de chaleur élevé,

atteint pour des hautes valeurs de WFS. Pour des pièces de géométries identiques, un ratio plus faible entraîne une consommation de matière plus élevée.

Gaz de protection

La quantité de gaz consommé par fabrication est présentée en Fig. 4.18. Étant donné que la consigne de gaz est fixée à 17 L/min, la consommation de gaz est directement liée au temps de soudage.

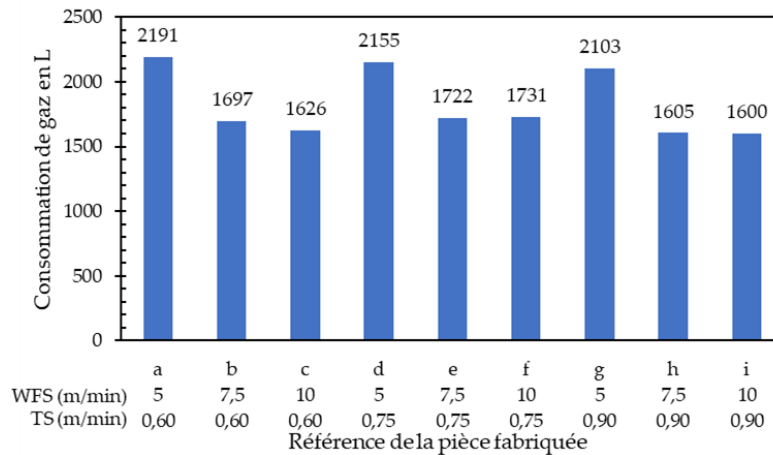


Fig. 4.18. Consommation de gaz pour les pièces fabriquées

Électricité

La puissance active consommée pour la fabrication des neufs murs fabriqués est reportée en Fig. 4.19. Une variation est également observée en fonction de WFS et TS. Un WFS élevé (pièces (c), (f) et (i)) provoque une consommation plus élevée due à l'augmentation du courant et de l'intensité selon la loi synergique, malgré un temps de soudage plus court (cf. Fig. 4.14).

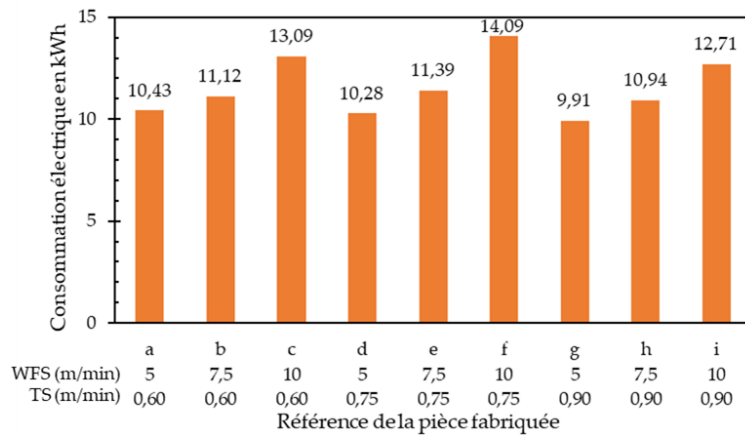


Fig. 4.19. Consommation électrique pour les pièces fabriquées

Lien entre les ressources consommées

La même tendance de consommation électrique et de consommation de matière est observée sur les figures Fig. 4.16 et Fig. 4.19. Cette tendance est inversée pour la consommation de gaz, celle-ci étant liée au temps de soudage. Il apparaît que **les quantités de ressources consommées sont liées au travers du temps de soudage et du temps de refroidissement.**

Afin de mettre en évidence les corrélations existantes entre les ressources consommées et le temps de fabrication, la Table 4.10 présente le coefficient de corrélation calculé entre ces réponses. Un coefficient de plus de 0,7 indique une corrélation. Un coefficient de moins de -0,7 indique une corrélation inversée.

Table 4.10. Coefficients de corrélation

Corrélations	Matière première	Gaz	Consommation électrique
Temps total	0,68	0,65	0,98
Temps de soudage	-0,81	0,99	-0,67
Temps de refroidissement	0,80	0,87	0,93

D'après les différentes réponses mesurées, les indicateurs de performances mécaniques et industrielles durables sont calculés dans la section suivante, pour chacune des pièces fabriquées.

4.3. Calcul des indicateurs de performances

4.3.1. Précision dimensionnelle

La Fig. 4.20 montre les écarts mesurés entre les nuages de points issus du scan des murs (c) et (g) avec la CAO. L'échelle de couleurs met en évidence ces écarts selon les zones de la pièce. Les contours en bleu indiquent les zones de plus faible écart et ceux en rouge l'écart maximal. On observe une meilleure précision dimensionnelle du mur (g) par rapport au mur (c).

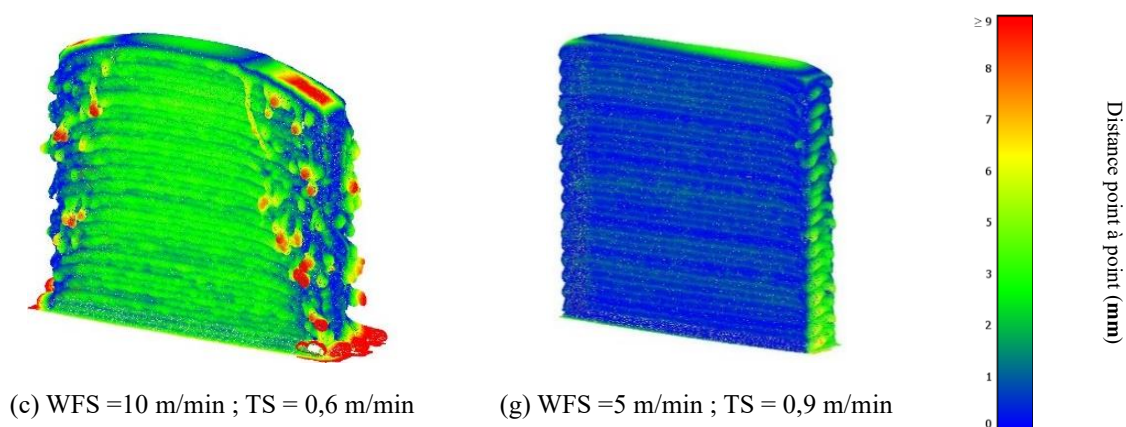


Fig. 4.20. Comparaison par nuage de points avec Cloudsoftware

Les valeurs d_{moy} et d_{max} sont obtenues et la précision dimensionnelle, $d_{\%}$, est calculée selon l'équation 3.3. Les résultats sont présentés en Table 4.11.

Table 4.11. Précision dimensionnelle des pièces fabriquées

Ref pièce	WFS m/min	TS m/min	e_i J/mm	d_{moy} mm	d_{max} mm	$d_{\%}$
(a)	5	0,60	165	$0,72 \pm 0,68$	10,48	99,55
(b)	7,5	0,60	234	$1,69 \pm 1,48$	15,61	98,94
(c)	10	0,60	291	$2,93 \pm 2,21$	13,15	98,17
(d)	5	0,75	132	$0,63 \pm 0,61$	9,10	99,61
(e)	7,5	0,75	188	$1,82 \pm 1,81$	13,48	98,87
(f)	10	0,75	233	$1,93 \pm 1,25$	16,38	98,80
(g)	5	0,90	110	$0,82 \pm 0,63$	9,20	99,49
(h)	7,5	0,90	157	$1,01 \pm 0,89$	12,75	99,37
(i)	10	0,90	194	$1,96 \pm 1,35$	22,06	98,77

La distance maximale d'écart à la CAO varie entre 9 et 22 mm. Malgré les reprises en usinage nécessaires pour les surfaces fonctionnelles du WAAM, un écart de plus de deux centimètres peut être préjudiciable pour la qualité de la pièce fabriquée. A minima ces données doivent être prises en compte lors de la conception pour ajouter des surépaisseurs permettant d'amortir ces écarts.

La distance moyenne d'écart à la CAO varie entre 0,63 et 2,93 mm. Les pièces présentant l'écart moyen le plus élevé présentent également la plus grande variabilité des écarts (écart-type plus élevé). Cette variabilité traduit une moins bonne précision dimensionnelle de la pièce fabriquée qui pourra être problématique pour la reprise en usinage ainsi que pour l'utilisation de la pièce.

La précision dimensionnelle, $d_{\%}$, varie de 98,2 à 99,6%. En observant la précision dimensionnelle par rapport à l'apport de chaleur, $d_{\%}$ est plus élevé lorsque e_i est faible. Cela montre qu'un faible e_i , entraîné par un TS élevé et un WFS faible, génère une géométrie plus précise de la pièce fabriquée. À l'inverse, les pièces fabriquées avec un e_i élevé, pour un WFS élevé, présentent une moins bonne précision dimensionnelle.

4.3.2. Force maximale admissible

La force maximale admissible de la pièce industrielle présentée en section 1.4.5 a été déterminée par simulation éléments finis sur Ansys pour les neuf configurations paramétriques du plan d'expériences.

Les valeurs adimensionnées de la force maximale admissible, F_{max} , de la contrainte équivalente, σ_{VM} et de la déformation équivalente sont spécifiés en Table 4.12.

Table 4.12. Résultats adimensionnés de la simulation par éléments finis

Ref pièce	F_{max}	σ_{VM}	Déformation équivalente
a	120%	120%	154%
b	119%	119%	181%
c	118%	118%	177%
d	120%	120%	154%
e	121%	121%	230%
f	119%	118%	154%
g	117%	117%	166%
h	115%	114%	194%
i	115%	115%	167%

Les données sont adimensionnées à la demande de l'industriel. La force maximale admissible est divisée par la force initiale spécifiée dans le cahier des charges. De même, la contrainte équivalente est divisée par la contrainte équivalente initiale et la déformation équivalente est divisée par la déformation équivalente initiale. Les valeurs de déformations équivalentes sont de l'ordre 10^{-2} mm.

La **force maximale admissible** varie entre 115% et 120% par rapport à la force spécifiée dans le cahier des charges en fonction des caractéristiques matériaux. Cette **variation de 5%**, pour une force d'ordre de grandeur 10^4 N, équivaut à une **variation de 500 N**.

4.3.3. Temps de fabrication

Les temps de soudage obtenus pour les neuf pièces fabriquées, selon le plan d'expériences factoriel complet, ont été détaillés en section 4.2.3.

4.3.4. Coût de fabrication

À partir des données comptables liées à l'utilisation de la machine sur la plateforme de recherche et de la littérature [159], les données nécessaires au calcul de coût ont été déterminées. Afin de ne pas divulguer d'information confidentielle, certaines données comptables ont été modifiées. Ces données, fixes pour l'ensemble des pièces fabriquées et propre à la fabrication du mur 316L dans notre contexte, sont synthétisées dans la Table 4.13. Le taux horaire opérateur a été défini dans le cadre de notre étude, où la machine est gérée par un ingénieur. Le temps requis par l'opérateur sur la machine est le temps de soudage auquel on ajoute une heure trente de préparation de la machine, des fichiers nécessaires à la fabrication, et de nettoyage après utilisation.

Table 4.13. Données fixes considérées pour notre étude de coût

Machine	Investissement	150 000 €
	Période amortissement	6 ans
	Coût outillage annuel	2 000 €
	Coût maintenance annuel	9 000 €
	Coût service annuel	7 500 €
Ressources	Fil 316L	9,97 €/kg
	Substrat 316L	68 €/unité
	Électricité	0,9 €/kWh
	Gaz	9,8 €/m ³
Main d'œuvre	Taux horaire	20 €/h

A partir des équations 3.7 à 3.13 développées en section 3.2.4 pour le calcul de coût, des données fixes précisées en Table 4.13 et des ressources consommées, le coût de fabrication de chaque pièce a été calculé. Les résultats des coûts intermédiaires et totaux sont présentés en Table 4.14.

Table 4.14. Résultats du calcul de coût en euros (€)

Réf pièce	Coûts machine	Coûts matière première	Coûts ressources consommées	Coûts humain	Coût total
(a)	30,9	127,5	33,0	72,6	264,1
(b)	24,0	136,3	28,3	63,1	251,8
(c)	22,6	145,5	29,3	61,2	258,6
(d)	30,5	124,7	32,5	72,0	259,7
(e)	23,0	135,7	28,8	61,7	249,2
(f)	24,1	135,9	31,4	63,2	254,6
(g)	29,8	122,9	31,6	71,1	255,4
(h)	22,7	130,2	27,2	61,3	241,3
(i)	22,5	136,8	28,7	61,1	249,2

Sur le coût total, un écart maximal de de 22,8 € soit 9% du coût moyen des pièces est observé entre la pièce la plus chère et la pièce la moins chère. Selon le nombre de pièces fabriquées, ce coût peut devenir significatif.

Le coût de fabrication dépend majoritairement de la consommation de matière première. Or, celle-ci est corrélée inverse au temps de soudage (cf. Table 4.10). De plus, le temps de soudage est un facteur direct du coût machine et du coût humain. **Le temps de soudage est donc un facteur important du coût.**

4.3.5. Éco-score

Selon la méthode définie en section 3.2.5, le logiciel OpenLCA, associé à la base de données Ecoinvent 2.0, est utilisé pour le calcul de l'éco-score. Les flux utilisés parmi les bases de données, d'après l'inventaire réalisé, sont les suivants :

- Pour le substrat : *SS304 Stainless Steel Plate Profile 47%PCR PAO*
- Pour le gaz de protection : mélange d'Argon : *Liquify Argon on Site GLO* et de CO2 : *market for carbon dioxide, liquid RER*
- Pour l'électricité : *market for electricity, medium voltage FR*
- Pour le transport : *market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 GLO*
- Pour le fil métallique d'apport : *Ship Metal Inert Gas (MIG) welding Stainless SS316L wire 12,000km 47%PCR GLO*

À partir de ces données et des ressources consommées, les impacts intermédiaires et finaux ont été calculés selon la méthode ReCiPe 2016 / World 2010 / Hierarchist pour chacun des neuf murs fabriqués.

Les résultats pour les catégories d'impacts intermédiaires de chaque pièce sont présentés en Annexe 4.G. Le score évaluant l'impact environnemental pour les catégories d'impact finales considérant la santé humaine, les écosystèmes et la raréfaction des ressources pour chaque pièce sont présentés en Table 4.15. L'éco-score est calculé selon l'équation 3.15 présentée en section 3.2.5.

Table 4.15. Résultats de de l'évaluation des impacts par ACV (catégories finales)

Réf pièce	Score Santé humaine Pts	Score Ecosystème Pts	Score Ressources Pts	Score total Pts
(a)	0,74	0,38	0,03	1,15
(b)	0,77	0,39	0,03	1,19
(c)	0,82	0,42	0,03	1,27
(d)	0,72	0,37	0,03	1,11
(e)	0,76	0,39	0,03	1,18
(f)	0,77	0,39	0,03	1,19
(g)	0,71	0,36	0,03	1,09
(h)	0,72	0,37	0,03	1,12
(i)	0,77	0,39	0,03	1,19

Les résultats montrent une variation de l'éco-score en fonction de différentes combinaisons de paramètres. Une variation maximale de 0.18 point est observée, soit 15%. La santé humaine est la catégorie la plus impactée alors que la catégorie ressources naturelles est la moins impactée.

Pour évaluer les impacts de chaque flux, la moyenne des scores des neuf pièces fabriquées selon chaque flux est présentée en Fig. 4.21. **La matière première consommée (fil et substrat) est le flux le plus impactant pour l'environnement**, suivi par l'électricité. Le transport des ressources et le gaz consommé ne sont que relativement peu impactants.

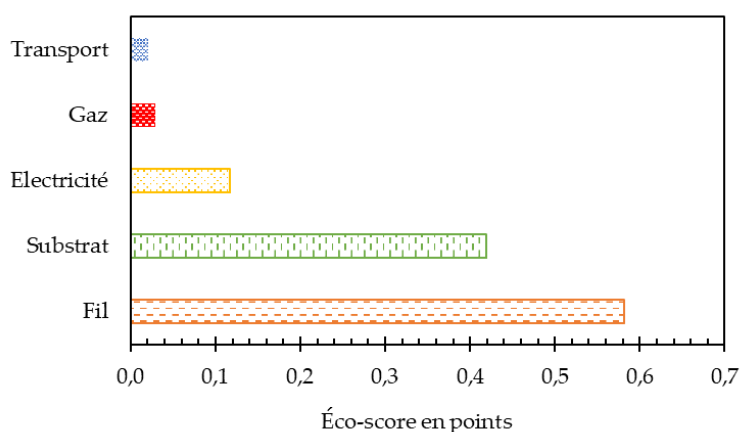


Fig. 4.21. Éco-score moyen pour les neuf pièces fabriquées, selon le flux d'entrée considéré

Les résultats obtenus sont cohérents avec les résultats d'ACV obtenus pour la fabrication d'acier 316L par WAAM dans les études de Dias *et al.* [155] et Kokare *et al.* [143].

4.4. Modélisation prédictive

Dans cette section, les relations analytiques entre entrées et sorties (telles que définies en Fig. 3.7 et section 3.2.6) obtenues, selon le plan d'expériences réalisé, sont mises en évidence. Pour chaque indicateur de performances, une régression polynomiale multiple est appliquée, couplée à une analyse de la variance (ANOVA) afin d'évaluer l'influence des différents termes de l'équation et la validité de la modélisation. Ces calculs ont été réalisés avec le logiciel Design Expert, pour un plan factoriel complet à deux facteurs et trois niveaux. La réplication du terme central a été simulée pour rendre les calculs possibles impliquant l'hypothèse d'une répétabilité des résultats obtenus.

Cette modélisation a permis d'obtenir les relations analytiques liants les indicateurs de performances aux paramètres WFS et TS.

4.4.1. Précision dimensionnelle

La Table 4.16 présente la modélisation analytique réalisée pour la précision dimensionnelle. L'équation 4.3 permet de prédire $d_{\%}$ en fonction de WFS et TS. La surface de réponse associée à l'équation est représentée en Fig. 4.22.

Table 4.16. Synthèse du modèle obtenu pour la précision dimensionnelle

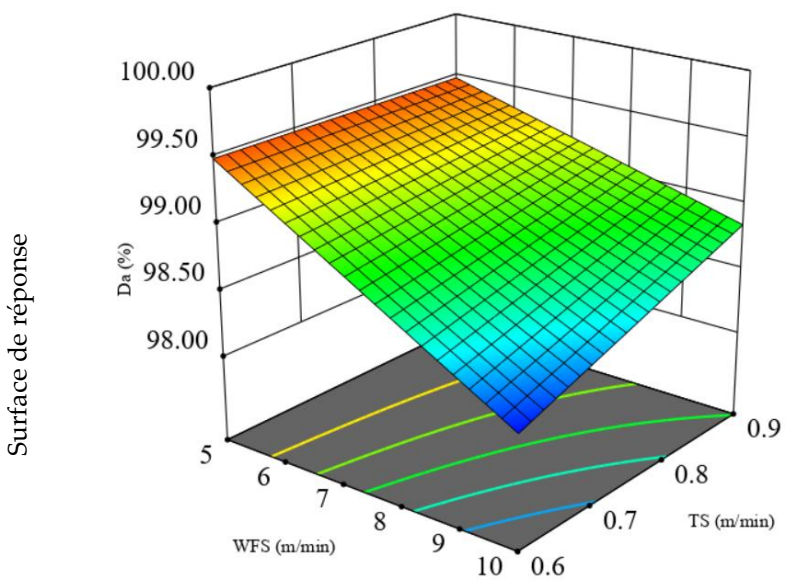
$d_{\%} = 102,13 - 0,53 WFS - 2,24 TS + 0,44 WFS.TS$ (4.3)	
	Mesures statistiques R^2 0,87 Adj- R^2 0,83 Predicted R^2 0,77 Adeq-Precision 14,2 F-Value 20,55
	p-value Modèle 0,0002 WFS <0,0001 TS 0,0390 WFS.TS 0,0748

Fig. 4.22. Surface de réponse de la précision dimensionnelle selon l'équation 4.3

Le modèle est significatif ($F - Value = 20,55$). Le R^2 prédit⁷ de 0,77 est raisonnablement en accord avec le R^2 ajusté de 0,83. L'*adequate precision*⁸ de 14,2 indique un signal adéquat. La Fig. 4.22 montre que la meilleure précision dimensionnelle, proche de 99,5%, est atteinte pour de faibles valeurs de WFS (5 m/min). La surface de réponse et l'analyse des p-value⁹ en Table 4.16 indiquent que WFS, TS sont des termes significatifs du modèle. **WFS et TS sont des paramètres significatifs de $d_{\%}$.**

⁷ Une différence inférieure à 0,2 entre le R^2 prédit et le R^2 ajusté indique qu'ils sont en accord.

⁸ L'*adequate precision* mesure le rapport signal/bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable.

⁹ Les p-value inférieures à 0,05 indiquent les termes significatifs du modèle. Les valeurs supérieures à 0,1 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

4.4.2. Force maximale admissible

La Table 4.17 présente la modélisation analytique réalisée pour la force maximale admissible. L'équation 4.4 permet de prédire F_{max} (adimensionnée) en fonction de WFS et TS. La surface de réponse associée à l'équation est représentée en Fig. 4.23.

Table 4.17. Synthèse du modèle obtenu pour la force maximale admissible

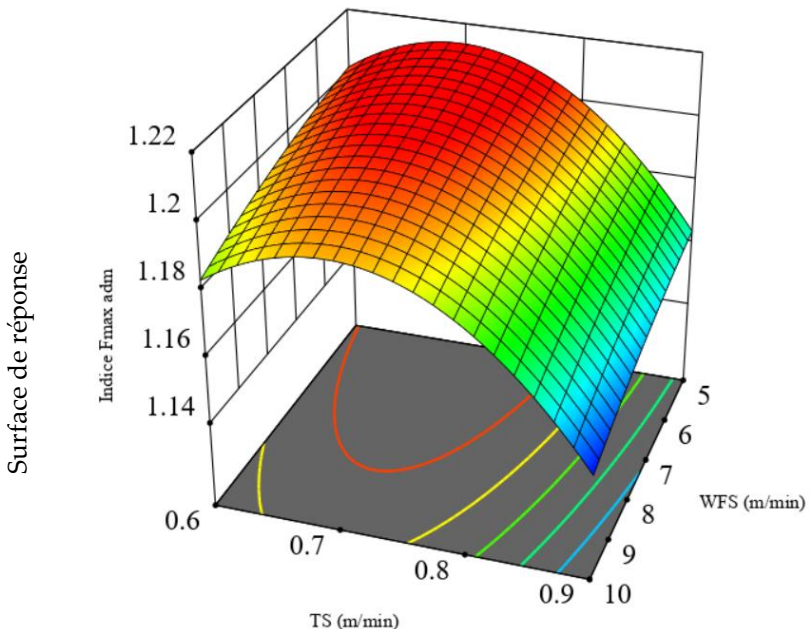
$F_{max} = 0,616 + 1,6 \times 10^{-3} WFS + 1,713 TS - 3,49 \times 10^{-4} WFS^2 - 1,226 TS^2$ (4.4)		
	Mesures statistiques	R^2 0,93 Adj- R^2 0,90 Predicted R^2 0,75 Adeq-Precision 15,5 F-Value 28,79
	p-value	Modèle < 0,0001 WFS 0,0106 TS 0,0001 WFS ² 0,6055 TS ² 0,0001

Fig. 4.23. Surface de réponse de la force maximale admissible adimensionnée selon l'équation 4.4

Le modèle est significatif ($F - Value = 28,79$). Le R^2 prédit de 0,75 est raisonnablement en accord avec le R^2 ajusté de 0,90. L'*adequate precision* de 15,5 indique un signal adéquat. La Fig. 4.23 montre que la plus grande force maximale admissible (1.21) est atteinte pour de faibles valeurs de WFS de 5 m/min et pour TS autour de 0,7 m/min. La surface de réponse et l'analyse des p-value en Table 4.17 indiquent que WFS, TS et TS² sont des termes significatifs du modèle. **WFS et TS sont des paramètres significatifs de la force maximale admissible.**

4.4.3. Temps de fabrication

La Table 4.18 présente la modélisation analytique réalisée pour le temps de fabrication. L'équation 4.5 permet de prédire t_{fab} en fonction de WFS et TS. La surface de réponse associée à l'équation est représentée en Fig. 4.24.

Table 4.18. Synthèse du modèle obtenu pour le temps de fabrication

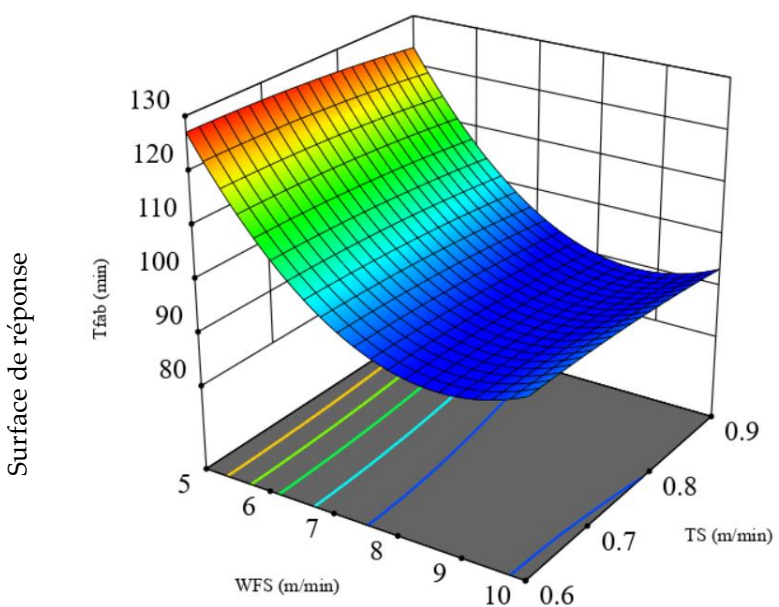
$t_{fab} = 268,4 - 43,2 WFS + 43,3 TS + 2,4 WFS^2 - 36,6 TS^2$ (4.5)		
	Mesures statistiques	R^2 0,98 Adj- R^2 0,97 Predicted R^2 0,93 Adeq-Precision 26,0 F-Value 119,3
	p-value	Modèle <0,0001 WFS <0,0001 TS 0,0795 WFS ² <0,0001 TS ² 0,5351

Fig. 4.24. Surface de réponse du temps de fabrication selon l'équation 4.5

Le modèle est significatif ($F - Value = 119,3$). Le R^2 prédit de 0,93 est raisonnablement en accord avec le R^2 ajusté de 0,97. L'*adequate precision* de 26 indique un signal adéquat. La Fig. 4.24 montre que les temps de fabrication les plus faibles, entre 80 et 90 minutes, sont atteints pour des valeurs élevées de WFS autour de 9 m/min. La surface de réponse et l'analyse des p-value en Table 4.18 indiquent que WFS et WFS² sont des termes significatifs du modèle. **WFS est un paramètre significatif du temps de fabrication.**

4.4.4. Coût de fabrication

La Table 4.19 présente la modélisation analytique réalisée pour le coût de fabrication. L'équation 4.6 permet de prédire C_{fab} en fonction de WFS et TS. La surface de réponse associée à l'équation est représentée en Fig. 4.25.

Table 4.19. Synthèse du modèle obtenu pour le coût de fabrication

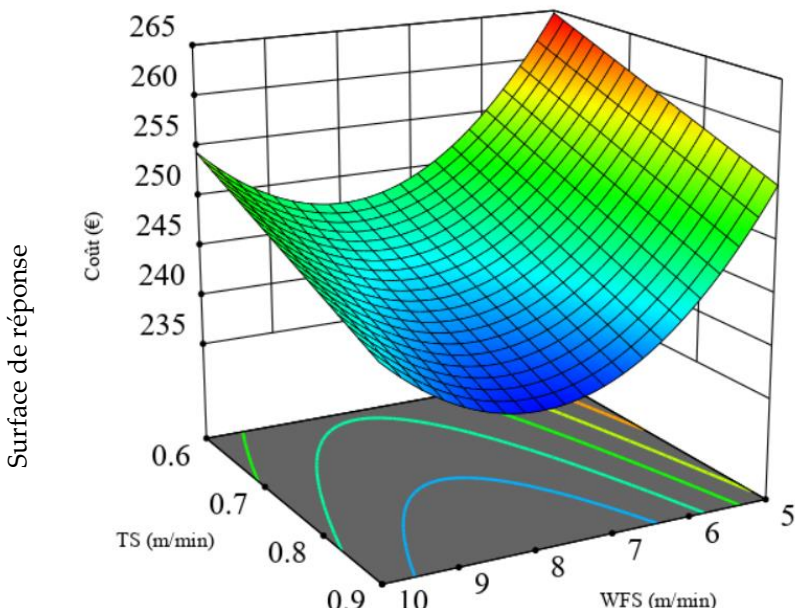
$C_{fab} = 386,3 - 27,7 WFS - 31,5 TS + 1,8 WFS^2$		(4.6)
Surface de réponse 	Mesures statistiques	R^2 0,99 Adj- R^2 0,99 Predicted R^2 0,99 Adeq-Precision 78,8 F-Value 647,67
	p-value	Modèle <0,0001 WFS <0,0001 TS <0,0001 WFS ² <0,0001

Fig. 4.25. Surface de réponse du coût de fabrication selon l'équation 4.6

Le modèle est significatif ($F - Value = 647,67$). Le R^2 prédit de 0,99 est en accord avec le R^2 ajusté de 0,99. L'*adequate precision* de 78,8 indique un signal adéquat. La Fig. 4.25 montre que le coût le plus faible proche de 235 € est atteint pour un WFS autour de 7,5 m/min et un TS élevé de 0,9 m/min. La surface de réponse et l'analyse des p-value en Table 4.19 indiquent que WFS, TS et WFS² sont des termes significatifs du modèle. **WFS et TS sont des paramètres significatifs du coût de fabrication.**

4.4.5. Éco-score

La Table 4.20 présente la modélisation analytique réalisée pour l'éco-score. L'équation 4.7 permet de le prédire en fonction de WFS et TS. La surface de réponse associée à l'équation est représentée en Fig. 4.26.

Table 4.20. Synthèse du modèle obtenu pour l'éco-score

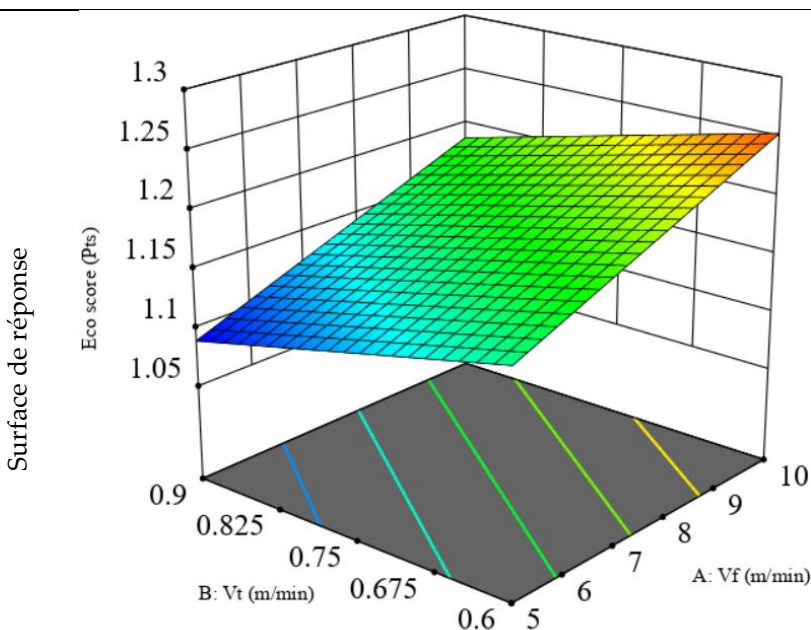
Eco – score = 1,1919 + 1,92 × 10⁻² WFS – 2,221 × 10⁻¹ TS (4.7)		
	Mesures statistiques	R² 0,89
		Adj- R² 0,87
	Predicted R² 0,82	
	Adeq-Precision 22,1	
	F-Value 44,05	
	p-value	Modèle < 0,0001
		WFS < 0,0001
		TS 0,0003

Fig. 4.26. Surface de réponse de l'éco-score selon l'équation 4.7

Le modèle est significatif ($F - Value = 44,05$). Le R^2 prédit de 0,82 est raisonnablement en accord avec le R^2 ajusté de 0,87. L'*adequate precision* de 22,1 indique un signal adéquat. La Fig. 4.26 montre que le meilleur éco-score, inférieur à 1,1 m/min est atteint pour de faibles valeurs de WFS (5 m/min) et des valeurs de TS élevées (0,9 m/min). La surface de réponse et l'analyse des p-value en Table 4.20 indiquent que WFS et TS sont des termes significatifs du modèle. **WFS et TS sont des paramètres significatifs de l'éco-score.**

4.4.6. Synthèse du modèle de performances obtenu

Le modèle de performances permet de prédire les indicateurs de performances mécaniques (précision dimensionnelle et force maximale admissible) et de performances industrielles durables (temps de fabrication, coût de fabrication et éco-score) en fonction des paramètres de fabrication du premier ordre. Les relations analytiques (équations 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 et 4.7) sont résumées ci-après :

$$d_{\%} = 102,13 - 0,53 WFS - 2,24 TS + 0,44 WFS.TS \quad (4.3)$$

$$F_{max} = 0,616 + 1,6 \times 10^{-3} WFS + 1,713 TS - 3,49 \times 10^{-4} WFS^2 - 1,226 TS^2 \quad (4.4)$$

$$t_{fab} = 268,4 - 43,2 WFS + 43,3 TS + 2,4 WFS^2 - 36,6 TS^2 \quad (4.5)$$

$$C_{fab} = 386,3 - 27,7 WFS - 31,5 TS + 1,8 WFS^2 \quad (4.6)$$

$$Eco - score = 1,1919 + 1,92 \times 10^{-2} WFS - 2,221 \times 10^{-1} TS \quad (4.7)$$

Pour $WFS \in [5; 10]$ m/min et pour $TS \in [0,6; 0,9]$ m/min

Le modèle proposé est précis dans la plage des valeurs de WFS et TS testées, pour le cas d'une fabrication d'un mur en acier 316L en WAAM CMT. L'analyse statistique confirme l'influence de WFS et TS sur ces indicateurs. Les variations parfois faibles des indicateurs en fonction de WFS et TS sont néanmoins significatives au regard des faibles plages de valeurs de paramètres étudiées.

Toutefois, le modèle proposé et appliqué à notre cas d'étude présente certaines limites qui devront être adressées dans de futurs travaux.

- Les valeurs nominales des paramètres ont été utilisées. Or, il existe des écarts avec les valeurs réelles, décrits en section 4.2.
- L'analyse ACV ne prend pas en compte les émissions de gaz (fumées de soudage) et de chaleur du procédé. De plus, les bases de données utilisées date de 2010.
- Le modèle de performances a été jugé pertinent statistiquement. Cependant, une validation expérimentale est nécessaire afin de pouvoir juger de sa précision et de sa cohérence pour la prédiction des indicateurs de performances.
- L'hypothèse de répétabilité doit être validée. Pour cela, plusieurs fabrications avec les mêmes paramètres doivent être menées. Les écarts entre les indicateurs de performances doivent être mesurés et reportés dans la modélisation ;
- Le modèle développé est limité à la fabrication en WAAM-CMT, à un matériau (316L) et une géométrie (de type de mur) pour deux paramètres analysés (WFS ; TS). Il serait intéressant d'étudier si les données obtenues ici sont transférables à d'autres études. Adapter le modèle à des géométries plus complexes et différents matériaux permettrait une caractérisation plus large du lien entre les paramètres de fabrication du procédé et les indicateurs de performances. Ces futures études pourront s'appuyer sur la méthodologie développée ici.
- L'influence d'autres paramètres de fabrication comme le débit de gaz, la température inter-couche, le temps inter-couche et l'apport d'énergie pourrait être investiguée.

Pour la fabrication d'un mur en acier 316L, les valeurs de WFS et TS permettant de minimiser le temps de fabrication, le coût de fabrication et l'éco-score ainsi que de maximiser la précision dimensionnelle et la force maximale admissible ont été recherchées. Les résultats sont présentés dans la Table 4.21.

Table 4.21. Indicateurs de performances optimaux calculés à partir du modèle de connaissances développé

Indicateur de performance	WFS optimal (m/min)	TS optimal (m/min)	Valeur du critère
$d_{\%}$	5	0,6	99,49%
F_{\max} (adimensionnée)	5	0,7	1,21
T_{fab} (min)	9	0,9	83
C_{fab} (€)	8.1	0,9	238
Eco-score (Pts)	5	0,9	1,088

Il apparaît clairement que le choix d'une combinaison de paramètres ne permet pas de favoriser l'ensemble des indicateurs.

4.5. Conclusion

Ce chapitre a permis la mise en application du modèle de performances présenté au Chapitre 3. Celui-ci est implémenté pour la fabrication d'un mur épais en acier 316L, représentatif d'une pièce d'outillage de manutention servant à lever des charges lourdes, en WAAM CMT. Un plan d'expériences est développé pour mesurer l'impact des paramètres WFS et TS sur les cinq indicateurs de performances mécaniques et industrielles durables définis. Les réponses du procédé de fabrication sont mesurées puis les indicateurs de performances sont calculés. À partir des résultats, cinq équations permettant de prédire la valeur de ces indicateurs en fonction de WFS et TS sont développées et constituent le modèle de performances. L'analyse statistique des modèles a permis de préciser l'influence de TS et WFS sur chacun des indicateurs et donnent une première indication de la précision du modèle.

La mesure des différentes réponses observées, relatives à la pièce et au procédé, permet d'alimenter les connaissances scientifiques sur la fabrication de pièces épaisses en WAAM. Les principales conclusions de ces observations sont :

- le matériau 316L issu du WAAM-CMT est isotrope. De faibles variations de la résistance mécanique en fonction de WFS et TS ont été observées sur le matériau fabriqué et elles se répercutent sur la force maximale admissible de la pièce du cas d'étude ;
- la géométrie des pièces fabriquées est liée à WFS et TS au travers de l'apport d'énergie ;
- le temps de fabrication et les ressources consommées sont corrélés et dépendent également de WFS et TS. Ainsi, le coût et l'éco-score varient en fonction de WFS et TS.

La difficulté de choisir des paramètres selon les indicateurs de performances a été mise en évidence. En effet, les valeurs optimales des indicateurs de performances mécaniques et industrielles durables sont atteintes pour des valeurs de WFS et TS divergentes. Le prochain chapitre présente le développement d'un modèle d'aide à la décision pour assister au choix des paramètres du procédé selon les performances ciblées.

Chapitre 5.

Aide à la décision pour le choix des paramètres de fabrication

Sommaire

5.1.	Un problème d'aide à la décision	111
5.1.1.	Définitions	111
5.1.2.	Formalisation du problème	111
5.1.3.	Généralisation du problème.....	112
5.1.4.	Pistes de résolution : les méthodes MCDM	113
5.2.	État de l'art : aide à la décision multicritère	115
5.2.1.	Aide à la décision multiobjectif	115
5.2.2.	Aide à la décision multiattribut	119
5.2.3.	Application des méthodes MCDM dans l'industrie.....	120
5.2.4.	Conclusion	122
5.3.	Modèle proposé	124
5.4.	Implémentation du modèle	128
5.4.1.	Définition des variables	128
5.4.2.	Implémentation de NSGA II	129
5.4.3.	Implémentation de TAMARIN.....	132
5.5.	Application du modèle pour le choix des paramètres de fabrication	136
5.5.1.	Données considérées	136
5.5.2.	Sélection des alternatives Pareto-optimales : NSGA II.....	136
5.5.3.	Classement des alternatives : TAMARIN.....	139
5.6.	Discussion sur le modèle proposé	144
5.6.1.	Retours industriels	144
5.6.2.	Perspectives d'évolutions du modèle.....	145
5.7.	Conclusion	147

Ce chapitre présente la troisième et dernière étape du cadre méthodologique outillé proposé dans nos travaux, tel qu'illustré en Fig. 5.1. Dans le chapitre précédent, le modèle de performances, appliqué à la fabrication d'un mur en acier 316L via le procédé WAAM, a permis d'établir les équations prédictives des indicateurs de performance ciblés en fonction de WFS et TS. À partir de ces équations, les paramètres de fabrication permettant d'atteindre les performances optimales, WFS et TS, ont été déterminés. Ces résultats ont souligné la divergence des paramètres de fabrication pour atteindre les indicateurs de performances optimaux et la difficulté, pour l'ingénieur procédé, de choisir les paramètres de fabrication idéaux. D'autant plus qu'aujourd'hui, ces paramètres sont davantage choisis par rapport à la fabricabilité de la pièce, que par rapport aux performances. Ainsi, nous posons la question de recherche suivante :

QR4 : Comment assister le choix des paramètres de fabrication d'un procédé DED en fonction des critères de performances mécaniques et industrielles durables ciblés ?

Nous considérons cette question comme une problématique d'aide à la décision multicritère, dont la résolution va être le sujet de ce chapitre. Pour y répondre, la section 0 pose le problème. La section 0 présente un état de l'art sur les méthodes d'aide à la décision multicritère. La section 5.3 propose un modèle d'aide à la décision. Puis, en section 5.4, l'implémentation du modèle est détaillée. La section 5.5 présente l'application du modèle et les résultats obtenus. Les limites et perspectives d'améliorations du modèle sont traitées en section 5.6. Enfin, la conclusion est présentée en section 5.7.

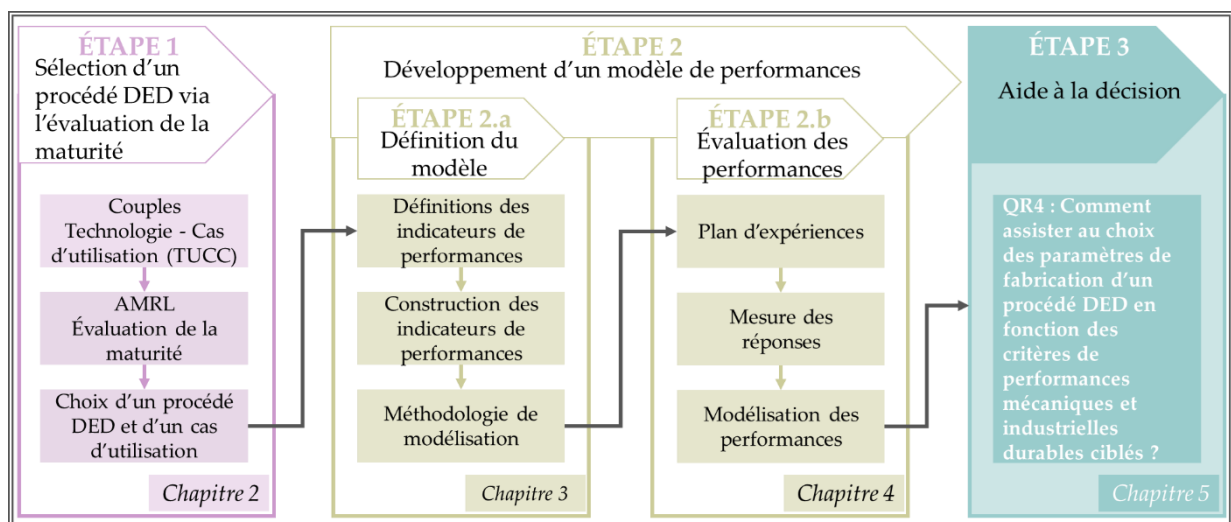


Fig. 5.1. Positionnement du chapitre 5 dans le cadre méthodologique de référence envisagé

5.1. Un problème d'aide à la décision

5.1.1. Définitions

Les systèmes d'aide à la décision (*Decision Support System* - DSS) permettent d'aider la **prise de décision en contexte industriel** depuis leur développement au début des années 1970 [177]. L'aide à la décision multicritère, ou *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), fait référence à l'aide à la décision pour choisir une alternative parmi un ensemble de solutions selon plusieurs critères souvent antagonistes [178].

Différents éléments caractérisent un problème MCDM. Selon les domaines considérés, ces différents éléments ne sont pas toujours définis de la même manière. Nous utilisons dans la suite du chapitre les définitions suivantes :

- Le **décideur** est la personne qui est confrontée au choix à réaliser. En raison de la complexité des relations entre les critères et les paramètres, le choix n'est pas évident. Un DSS pourra ainsi aider le décideur à effectuer ce choix, mais ne prendra pas la décision à sa place [179].
- Les **alternatives** constituent les solutions admissibles parmi lesquelles peut choisir le décideur.
- Les **variables de décisions** sont les paramètres inconnus de la définition mathématique du problème. Chaque alternative constitue une combinaison unique des variables de décisions considérées.
- Les **critères** sont les éléments permettant de choisir parmi les alternatives. Ils peuvent être qualitatifs et quantitatifs. L'objectif du DSS est de déterminer un classement, une description ou une évaluation des alternatives sur la base de critères donnés. Les critères varient selon les variables de décision considérées pour chaque alternative.
- Les **fonctions objectif** sont l'expression de l'atteinte d'un critère en fonction des variables de décision. Un critère peut être optimisé (atteinte d'une valeur maximale, minimale ou ciblée).
- Les **fonctions contrainte** sont les limites imposées au problème, qui définissent l'espace des solutions admissibles du problème : les alternatives. Ces limites peuvent être attribuées aux variables des décisions (limitation du domaine des valeurs, espace discret ou continu) ou aux critères (valeurs limites à ne pas dépasser ou à atteindre).

5.1.2. Formalisation du problème

Dans ces travaux, nous considérons un problème d'aide à la décision comportant :

- un décideur : l'ingénieur procédé ;

- deux variables de décisions : les paramètres de fabrication WFS et TS ;
- cinq critères : la précision dimensionnelle, la force maximale admissible, le temps de fabrication, le coût de fabrication et l'éco-score.

Les fonctions objectif sont définies par les équations 5.1 à 5.4 :

$$f_4(WFS, TS) = \max (\text{précision dimensionnelle}) \quad (5.1)$$

$$f_3(WFS, TS) = \min (\text{temps de fabrication}) \quad (5.2)$$

$$f_1(WFS, TS) = \min (\text{coût de fabrication}) \quad (5.3)$$

$$f_2(WFS, TS) = \min (\text{éco - score}) \quad (5.4)$$

Les fonctions contraintes considérées sont définies par les équations 5.5 à 5.7 :

$$g_1(WFS, TS) = F_{max} \geq F \quad (5.5)$$

$$WFS \in [5 ; 10] \text{ m/min} \quad (5.6)$$

$$TS \in [0,6 ; 0,9] \text{ m/min} \quad (5.7)$$

L'ingénieur procédé cherche donc une alternative (soit une **combinaison de paramètres WFS et TS**) qui **minimise le temps de fabrication** (équation 5.2), **le coût de fabrication** (équation 5.3) **et l'éco-score** (équation 5.4) en **garantissant la tenue mécanique** (équation 5.6), et en **maximisant la précision dimensionnelle** (équation 5.1) de la pièce fabriquée en WAAM.

Le problème est **multicritère et multivariable**. Les variables de décision sont **discrètes** : le pas des valeurs, et donc le nombre d'alternatives possibles dépend des machines utilisées. Les fonctions objectif, issues du modèle de performances développé au chapitre précédent, sont des **fonctions polynomiales continues de degré deux** (équations 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 et 4.7). En section 4.4.6, il a été montré qu'un couple optimal n'existe pas. Le choix d'une alternative satisfaisant les différents critères n'est donc pas évident. **Le problème est complexe pour le décideur car il ne peut appréhender de manière intuitive l'impact des paramètres sur les critères.**

5.1.3. Généralisation du problème

Le problème présenté au travers du cas d'étude est un problème d'aide à la décision multicritère. Un modèle MCDM doit donc être défini pour l'adresser. Cependant, nous ne cherchons pas ici à résoudre uniquement le problème du cas d'étude, mais à proposer un **modèle généralisable au choix des paramètres des procédés DED** en fonction des performances, afin de l'intégrer au cadre méthodologique outillé proposé.

Pour le problème d'aide au choix des paramètres présenté ci-dessus, le nombre d'alternatives est une fonction combinatoire du nombre de paramètres considérés (deux dans le cas d'étude)

et dépend également de l'échantillonnage des valeurs de ces paramètres. Le modèle développé doit donc être **extensible**, pour prendre en compte un nombre d'alternatives beaucoup plus élevé.

Ainsi, le modèle d'aide à la décision envisagé doit adresser les besoins suivants.

- Permettre la résolution du **problème d'aide à la décision multicritère et multivariable** présenté, intégrant des **fonctions objectif et contrainte** sous forme d'équations polynomiales continues de degré deux.
- Être adapté à différents modèles de performances relatifs à des cas d'études variés (procédé, géométrie, matériau) :
 - o prenant en compte davantage de paramètres de fabrication (variables de décision) avec des plages de valeurs plus élevées, soit une **augmentation exponentielle du nombre d'alternatives**, continues ou discrètes ;
 - o avec un **nombre de critères modulable** et répartis en fonctions objectif et contrainte selon le cas d'étude.
- Prendre en compte les **incertitudes du modèle de performances et du décideur**.
- Être **efficace** : converger vers les solutions optimales rapidement, et s'assurer de trouver les meilleures solutions parmi l'ensemble des solutions existantes.
- Être **interactif et facile d'utilisation** : le modèle doit aider l'ingénieur à choisir les paramètres les plus adaptés à son besoin. Il devra permettre à l'ingénieur de manipuler simplement ses critères. Le modèle n'exigera pas un expert spécialement formé pour le faire fonctionner.
- Être **adapté** au décideur : un ingénieur procédé doit pouvoir l'utiliser pour choisir une combinaison de paramètres de fabrications selon le modèle de performances défini en amont et ses besoins.

5.1.4. Pistes de résolution : les méthodes MCDM

Le problème présenté s'inscrit dans les problématiques d'aide à la décision multicritères définies par Roy [180].

- La **problématique de choix** consiste à choisir, parmi l'ensemble des alternatives, un sous-ensemble le plus restreint possible, contenant les meilleures solutions. Du fait de la dimension multicritère de la problématique, un compromis doit être mis en place.
- La **problématique de classement** consiste à ordonner les alternatives selon leur performance et les préférences du décideur afin de les comparer.

Les méthodes MCDM permettent de formuler et de résoudre des problèmes d'aide à la décision [181]. Parmi ces méthodes, Hwang et Yoon [182] ont défini deux catégories qui permettent d'adresser les deux problématiques de décision mentionnées ci-dessus.

- L'**aide à la décision multiobjectif** (*Multiple Objective Decision Making* - MODM) permet d'identifier une ou des solutions satisfaisantes parmi un ensemble infini d'alternatives selon un ensemble de critères. Elle est aussi nommée optimisation multiobjectif.
- L'**aide à la décision multiattribut** (*Multiple Attribute Decision Making* - MADM) évalue un ensemble fini d'alternatives au moyen de comparaisons entre les critères, selon les préférences du décideur [183].

Le MODM permet donc de gérer des **espaces d'alternatives continues ou discrètes de grande dimension**. Le MADM permet l'**évaluation de l'ensemble des alternatives considérées**, à condition que l'ensemble soit fini [184].

Pour le problème d'aide au choix des paramètres du procédé, présenté ci-dessus, **nous proposons un modèle hybride**, fonctionnant en deux temps. Tout d'abord, la mise en œuvre d'une méthode MODM permet de sélectionner un ensemble réduit d'alternatives satisfaisantes par rapport à l'ensemble critères. Puis, une méthode MADM assiste le décideur à choisir une solution qui lui convient parmi cet ensemble réduit d'alternatives. La Fig. 5.2 illustre cette approche hybride. Ces méthodes sont donc explorées dans l'état de l'art présenté dans la prochaine section.

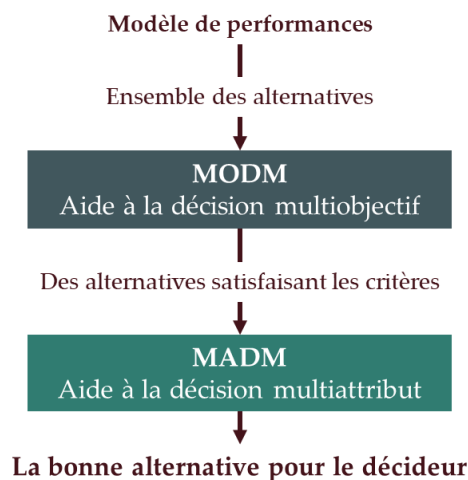


Fig. 5.2. Modèle d'aide à la décision hybride proposé

5.2. État de l'art : aide à la décision multicritère

5.2.1. Aide à la décision multiobjectif

Les méthodes MODM sont classées en deux catégories : les méthodes dites exactes ou classiques et les **méthodes approchées** (heuristiques et métaheuristiques) [185]. Parmi les méthodes classiques, on retrouve notamment les *weighted sum methods* (méthodes des sommes pondérées) et le *goal programming* qui permettent de résoudre des problèmes déterministes tels que la planification de la production, la sélection des machines-outils et les problèmes de transport et de livraison dans les chaînes d'approvisionnement [186]. Les méthodes heuristiques¹⁰ et **métaheuristiques** sont des stratégies de recherche de solutions et d'exploration de l'espace des solutions, inspirées de processus biologiques, physiques ou comportementaux connus [187]. Elles permettent de résoudre des problèmes dits difficiles de manière plus efficace que les méthodes classiques [188].

Osman et Laporte définissent les méthodes métaheuristiques comme un processus de génération itératif qui combine intelligemment différents concepts pour explorer et exploiter l'espace de recherche afin de trouver efficacement des solutions proches de l'optimum [189]. **Ces méthodes permettent de résoudre des problèmes d'optimisation multiobjectif de manière efficace** : en convergeant rapidement vers une ou des solutions optimales qualitatives, en passant en revue l'ensemble de l'espace des solutions (pour éviter de converger vers un extremum local) [190].

Le problème que nous avons défini peut être considéré comme « difficile » vis-à-vis de la taille potentielle de l'espace des alternatives admissibles et le nombre de fonctions objectif. **Ainsi, dans nos travaux, nous décidons d'explorer les méthodes métaheuristiques.**

Méthodes métaheuristiques

Parmi les méthodes métaheuristiques, on distingue les algorithmes basés sur la recherche d'une solution unique (tels que *simulated annealing*, ou *guided local search*) ou **basés sur une population** (tels que *genetic algorithm* ou *particle swarm optimisation*). Se baser sur une solution unique signifie qu'une solution candidate est améliorée jusqu'à atteindre la solution optimale. Dans ces méthodes, un plus grand risque existe de converger vers un extremum local [190]. Se baser sur une population signifie, à l'inverse, que la solution optimale est recherchée parmi un ensemble de solutions candidates. Les méthodes basées sur la population les plus utilisées sont traitées dans la suite de cette section. Dans ces méthodes, les alternatives sont représentées par des individus. Ces individus sont caractérisés par leurs variables de décisions et les performances atteintes selon les différents critères observés.

¹⁰ Du grec *heuriskein* qui signifie trouver

Intelligence en essaim

L'intelligence en essaim est une méthode métaheuristique basée sur le comportement des nuées ou essaims d'oiseaux ou d'insectes. Ici, une population initiale appelée essaim est créée. Les individus la constituant, nommés particules, évoluent pas à pas. Les alternatives sont examinées de proche en proche. Ainsi, l'essaim se déplace dans l'espace des solutions. Les mutations sont réalisées de manière itérative, sur l'ensemble de l'essaim, selon la meilleure solution atteinte par une particule de l'essaim lors des itérations précédentes. La vitesse de déplacement évolue à chaque itération. Cette méthode peut être implémentée de manière aisée [191]. Pour être efficace, cet algorithme nécessite une taille de population conséquente. Plusieurs recherches ont mis en lumière que ces algorithmes tendent à stagner ou convergent facilement vers des extremums locaux [188,191]. Ainsi, la rapidité de calcul et la diversité des solutions optimales ne sont pas assurées. Les algorithmes les plus utilisés sont le *particle swarm optimisation* et *ant colony optimisation*. Ces algorithmes sont surtout utilisés dans les domaines de la logistique, de la planification et de la gestion de production. **Pour les problèmes d'optimisation des paramètres de fabrication, il a été montré que les méthodes d'algorithmes évolutionnaires étaient plus performantes que les méthodes d'intelligence en essaim** [190].

Algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires (AE) multiobjectif sont des méthodes MODM métaheuristicques basées sur la population qui reflètent les mécanismes d'évolution naturelle [192]. Les AE s'inspirent de la **théorie de l'évolution**. Chaque **individu** est caractérisé par ses **gènes** représentant **les variables de décision** [193]. Chaque combinaison de variables, donc de gènes, est unique. L'ensemble des individus représente l'ensemble des alternatives. Parmi ces individus, une population aléatoire de n individus est prélevée. Chaque individu est évalué par rapport à chaque critère puis les individus sont comparés entre eux. Les meilleurs sont sélectionnés. À partir des individus sélectionnés, une nouvelle population est créée.

Les algorithmes évolutionnaires multiobjectif se distinguent selon deux principes de sélection des solutions : la **décomposition** ou la **dominance** (au sens de Pareto). Le principe de décomposition consiste à **décomposer le problème multiobjectif en sous-problèmes monoobjectif** et à résoudre ces problèmes monoobjectifs l'un après l'autre ou simultanément. La dominance au sens de Pareto¹¹ consiste à **comparer deux solutions entre elles par rapport à l'ensemble des critères considérés**. Dans le cas d'optimisation multiobjectif, les solutions optimales sont les solutions qui ne sont dominées par aucune autre solution. La Fig. 5.3 illustre ce concept pour un ensemble de solutions selon deux objectifs, f_1 et f_2 , à minimiser. Selon le principe de dominance au sens de Pareto, les solutions optimales constituent un front, appelé **front de Pareto**. Les solutions présentes sur ce front sont les solutions du problème qui ne sont

¹¹ La dominance au sens de Pareto est définie comme suit [188]. Une solution x domine une solution y si : $\forall i \in \{1,2, \dots, m\}, f_i(x) \leq f_i(y)$ et $\exists j \in \{1,2, \dots, m\}, f_j(x) < f_j(y)$ pour m critères à minimiser.

pas dominées. **On ne peut pas les améliorer par rapport à un critère sans les détériorer par rapport à l'autre critère** [194].

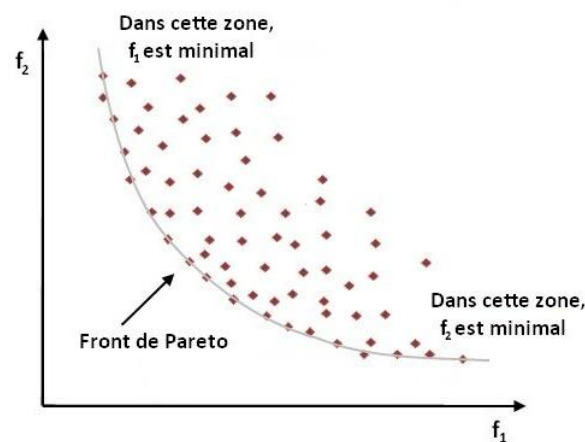


Fig. 5.3. Illustration du front de Pareto d'après Gardeux [195]

Le *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA II) et le *S-Metric Selection - Evolutionary Multiobjective Optimisation Algorithm* (SMS-EMOA) sont des algorithmes évolutionnaires utilisant le principe de **dominance au sens de Pareto**. **SPEA II** calcule la domination d'une solution selon le nombre de solutions qu'elle domine et le nombre de solutions qui la dominent. De plus, l'espace des solutions est découpé et le nombre de solutions par cellule est limité afin de **forcer la diversité des solutions** à travers l'espace de recherche [196]. SPEA II est un algorithme **performant** et **aisé à implémenter**. SPEA II est adapté aux **espaces de solutions continus**. SMS-EMOA introduit un **indicateur de mesure de la performance de l'optimisation : l'hypervolume** [197]. Cet indicateur mesure la taille de l'espace dominé par une solution. L'algorithme cherche à obtenir la population qui permet de maximiser l'indicateur, c'est-à-dire la population qui domine le plus l'espace des solutions. Cet algorithme est performant, mais souffre d'une **complexité de calcul exponentielle** [198].

Le *Multi Objective Evolutionary Algorithm / Decomposition* (MOEA/D) est un algorithme évolutionnaire utilisant le **principe de la décomposition**. Il a été développé par Zhang et Li en 2007 [199]. Ici, un **vecteur de poids est défini en amont** de l'optimisation. Ce vecteur est appliqué à l'ensemble de l'espace des solutions. Les solutions de la population initiale sont comparées à un de leurs voisins grâce à la fonction objectif scalarisée (avec le vecteur de poids). Si un voisin est meilleur qu'une solution de la population, celle-ci est remplacée et la recherche reprend à partir de la nouvelle population. Une méthode de décomposition permet de diviser la population en plusieurs sous-populations. Chaque sous-population évolue séparément afin d'améliorer la diversité des solutions et la performance de la recherche d'optimum. Pour éviter les inconvénients de la MOEA/D, tels que la **convergence médiocre** et la **difficulté de définir une taille de voisinage raisonnable**, d'autres méthodes d'optimisation lui sont couplées, augmentant sa complexité d'implémentation [188]. Sa principale limitation est la définition du vecteur de poids en amont de l'optimisation [200]. MOEA/D est **particulièrement adapté aux problèmes avec un grand nombre d'objectifs** (> 4).

Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (notés AG) sont des algorithmes évolutionnaires fréquemment utilisés dans des domaines variés tels que le traitement d'images, la planification de trajectoire dans les jeux vidéo et pour la conception industrielle de portes d'avion [187,201]. Dans les AG, la création de la nouvelle population est réalisée via des opérations de croisement et de mutation des individus les plus performants de la génération précédente. La nouvelle population ainsi créée est la nouvelle génération. Elle est à son tour évaluée, sélectionnée, puis mutée et croisée. Cette boucle est répétée jusqu'à atteindre un nombre de générations prédéfini comme illustré en Fig. 5.4. Les gènes qui favorisent les solutions optimales sont donc sélectionnés et reproduits à travers les générations. Selon les données du problème et les techniques utilisées, la convergence des solutions est atteinte plus ou moins rapidement. Finalement, les solutions optimales qui satisfont le mieux les critères sont obtenues.

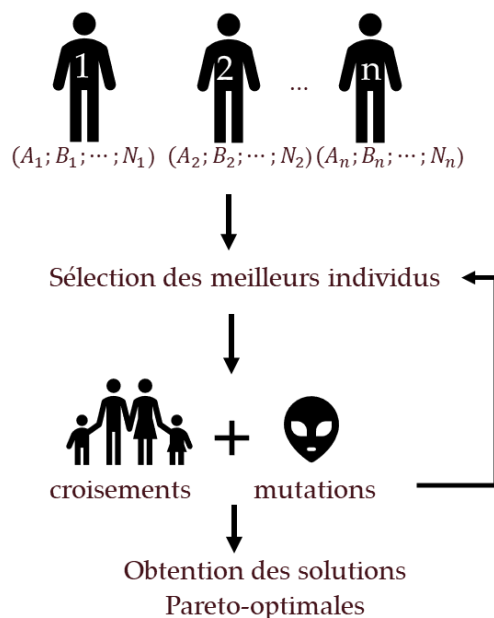


Fig. 5.4 Fonctionnement d'un algorithme génétique

Les AG sont de puissants algorithmes et un nombre élevé d'itérations permet de s'assurer de trouver les extremums globaux [202]. Différents modèles d'AG ont été développés selon le codage des gènes des individus, le choix des opérateurs de croisements et de mutation, la fonction d'évaluation et le mode de sélection des solutions [203].

En 2002, le modèle *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA II) a été développé [202]. Cet algorithme de la famille des AG, basé sur la **dominance au sens de Pareto**, est aujourd'hui l'un des plus utilisés dans la littérature pour la résolution de problèmes d'optimisation multiobjectif [204]. Le fonctionnement de cet algorithme est basé sur l'introduction d'un opérateur spécifique permettant de comparer les individus au sein d'un même front de Pareto. Il s'agit de la **distance d'encombrement**. Cet indicateur permet à chaque génération de cibler les solutions les plus isolées sur le front de Pareto. Cela permet de **garantir une grande**

diversité des solutions sur le front de Pareto. À chaque génération, les individus sont classés en fonction de leur rang de non-domination dans différents fronts de Pareto (chaque front correspond à un rang de non-domination). Le front le moins élevé contient les meilleures solutions (celles qui sont dominées par le moins de solutions). Les meilleures solutions sont déterminées en fonction de leur rang et la distance d'encombrement qui **garantit l'élitisme de l'algorithme**. Puis la nouvelle population est créée en mutant et en croisant les individus sélectionnés. NSGA II permet une **convergence rapide** et une diversité des solutions sur le front de Pareto [204]. Il est applicable à des problèmes avec une **taille de population variée**, celle-ci pouvant être très grande. De plus, il est applicable aussi bien à des espaces de **solutions continues et discrètes** [200]. La principale limitation du NSGA II réside dans sa **difficulté à adresser des problèmes avec plus de dix objectifs** [194]. Cependant, de récentes améliorations algorithmiques ont été apportées pour y remédier [204].

5.2.2. Aide à la décision multiattribut

Le choix de paramètres de fabrication parmi un ensemble réduit de solutions optimisées relève du décideur. Néanmoins, le problème peut s'avérer difficile si plusieurs critères entraînant des choix de paramètres divergents doivent être pris en compte. Pour cela, diverses méthodes MADM ont été développées, qui permettent au décideur de choisir une alternative en les classant d'après ses préférences. Jamwal *et al.* [205], dans leur revue des modèles d'aide à la décision multicritères appliqués au domaine de la fabrication industrielle, catégorisent les méthodes MADM en : (i) modèles de mesure de la valeur, (ii) modèles d'objectifs et de références et (iii) modèles de classement (*outranking*).

AHP

La méthode AHP (*Analytical Hierarchy Process*) fait partie des modèles de mesure de la valeur (i). C'est une méthode de type **comparaison deux à deux** développée en 1990 [206]. Les objectifs sont hiérarchisés suite à ces comparaisons, puis les poids de chaque critère sont calculés. Enfin, le score de chaque alternative est calculé à partir du score pour chacun des critères. Si cette méthode est **simple** et **flexible**, elle peut être **délicate à résoudre quand le nombre de critères augmente ainsi que pour les équations linéaires**. En effet, les comparaisons deux à deux participent à augmenter significativement le temps de calcul des solutions. Du fait de son **adaptabilité** et de sa **facilité d'utilisation**, elle est répandue dans le domaine de la logistique et des transports [205].

TOPSIS

La méthode TOPSIS (*Techniques for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) est une méthode d'objectifs et de références (ii) développée en 1981 par Hwang et Yoon [182]. **Cette méthode sélectionne la meilleure solution comme étant celle qui est à la fois la plus proche de la solution idéale et la plus éloignée de la solution anti-idéale**. La première étape est la construction de la matrice de décision. Après l'avoir normalisée pour pouvoir comparer les solutions entre elles, les poids définis par le décideur sont attribués aux différents critères. Les

matrices idéales positives et négatives sont calculées à partir de l'ensemble des alternatives. Enfin, le calcul de l'écart de chaque solution à la solution idéale positive et la solution idéale négative permet de classer les solutions. La méthode TOPSIS **a déjà été utilisée dans des problèmes d'optimisation de paramètres de fabrication** et couplée avec des méthodes MODM [205,207]. Cependant, cette méthode ne favorise pas l'interaction entre le décideur et le modèle d'aide à la décision, car la **pondération des critères** est réalisée **a priori** et n'est pas intégrée directement à l'algorithme. Il n'est pas toujours aisé pour le décideur d'attribuer lui-même un poids aux différents critères a priori.

TAMARIN

Cette nouvelle méthode de classement (iii) a été proposée en 2022 [208]. L'algorithme TAMARIN permet un **classement des alternatives de manière interactive** avec le décideur au travers d'une **interface utilisateur dynamique**. TAMARIN classe les alternatives selon chaque critère, selon un principe de dominance, et selon la pondération relative des dominances par critères donnée par le décideur.

Le décideur sélectionne les critères, les hiérarchise entre eux (en leur attribuant une importance relative) et définit leur granularité via l'interface. La granularité permet d'**intégrer un niveau d'incertitude sur un critère** pour ne pas discriminer des alternatives dont les valeurs sur ce critère sont proches. Si le décideur est satisfait, il choisit l'alternative la mieux classée. Sinon, il modifie, via l'interface, la sélection des critères, leur granularité et leur importance et visualise en direct les effets sur le classement des alternatives.

TAMARIN permet donc au décideur de hiérarchiser les critères de manière interactive, **en visualisant en direct ses effets sur le classement des alternatives**. De plus, cet algorithme est en cours de développement au sein de l'axe de recherche THS (Systèmes Technologiques et Humains) d'ESTIA Recherche, dans le cadre duquel son réalisés ces travaux. Ce modèle a été testé sur plusieurs cas d'étude, pour la sélection de technologies d'isolations de bâtiments par rapport à six critères [208].

5.2.3. Application des méthodes MCDM dans l'industrie

Choix des paramètres de fabrication

Plusieurs travaux ont proposé des approches hybrides (MODM et MADM), en particulier avec NSGA II, dans des contextes industriels.

Une étude récente a étudié l'optimisation des paramètres d'usinage d'un matériau renforcé en fibre de carbone [207]. Le problème considéré vise l'optimisation de trois critères de performance, deux liés à la pièce et un lié au processus. Les deux variables de décision sont les paramètres d'usinage : vitesse d'avance et vitesse de rotation. En appliquant l'algorithme

NSGA II, des solutions **Pareto-optimales**¹² sont trouvées. Puis ces solutions sont classées avec la méthode TOPSIS. En effet, le NSGA II a permis d'obtenir neuf solutions optimales, ce qui est un nombre trop élevé de solutions pour permettre le choix des paramètres de fabrication. En utilisant TOPSIS, la solution la plus proche de la solution idéale envisagée par le décideur a été trouvée. Cependant, cette dernière méthode **demande au décideur d'avoir une idée précise de la pondération** qu'il souhaite appliquer aux critères.

Kumar *et al.* [209] ont présenté une approche hybride intégrant une optimisation paramétrique basée sur l'analyse de la variance permettant d'obtenir des paramètres optimisés du processus. Puis TOPSIS est appliqué pour effectuer une sélection multi-objectifs parmi ces sous-ensembles. Cette méthode a été appliquée au procédé d'extrusion à double vis pour la fabrication de polymères composites, afin d'optimiser les propriétés mécaniques du matériau fabriqué.

Pawar and Rai Kalal [210] ont travaillé sur l'optimisation des paramètres du procédé de rectification. Différents paramètres de fabrication tels que la vitesse de rotation de la meule, la vitesse d'avance de la pièce, la profondeur de passe et la distance de travail ont été optimisés en fonction des critères suivants : coût de production, taux de production et état de surface obtenu. Ce problème d'optimisation a été résolu avec l'algorithme NSGA II. Les résultats, sous forme de plages de valeurs des différents paramètres, ont été comparés à ceux obtenus avec PSO. **NSGA II a permis d'obtenir de meilleurs résultats en termes de convergence et diversité des solutions.**

Une méthode d'optimisation multicritère articulant le NSGA II avec un couplage des méthodes AHP et TOPSIS a été développée par Fortunet [201]. L'optimisation NSGA II permet d'obtenir les solutions Pareto-optimales qui sont ensuite classées selon le souhait du décideur. AHP est ici nécessaire pour assister la pondération des critères pour mettre en œuvre TOPSIS. L'optimisation mise en place est efficace, mais l'implémentation des méthodes TOPSIS et AHP est **complexe** pour le décideur.

Choix des paramètres de FA

Des travaux portant sur l'optimisation des paramètres de fabrication au regard des **performances mécaniques et industrielles durables** de la pièce produite ont été menés pour la FA polymère. Un modèle permettant d'optimiser les paramètres d'impression d'un procédé de FA polymère a été développé pour aider les fabricants dans la sélection des paramètres en fonction des critères de temps de production, de matière consommée, d'état de surface et de performance mécanique [211]. Les **quatre variables de décision** choisies par les auteurs sont les trois angles de positionnement de la pièce et la hauteur de couche. Ce problème d'optimisation multiobjectif a été résolu à l'aide de l'algorithme **NSGA II**.

¹² Les solutions Pareto-optimales désignent les solutions non dominées, appartenant au premier front de Pareto.

Différents problèmes d'optimisation de paramètres de FA ont été résolus avec des méthodes MADM. Kamaal *et al.* [212] ont étudié l'influence de l'orientation, du pourcentage de remplissage et de la hauteur de la couche sur la résistance à la traction et la résistance à l'impact d'un composite fibre de carbone-acide polylactique fabriqué par FDM. TOPSIS a été utilisé pour trouver la meilleure alternative qui permet d'obtenir la résistance maximale avec un minimum de matière. De même, Sugavaneswaran *et al.* [213] ont étudié l'effet combiné des paramètres du processus FDM et du lissage à la vapeur sur la qualité des pièces. Les paramètres du processus comprennent l'angle d'orientation, la surface de construction et le temps d'exposition, tandis que les indicateurs de qualité des pièces sont la rugosité de la surface et le pourcentage d'erreur dimensionnelle. **La méthode TOPSIS a permis d'obtenir des résultats satisfaisants.**

Sakthivel et Vinod [214] ont également développé une méthode hybride permettant, dans un premier temps, d'obtenir un ensemble de solutions optimales. Puis, les méthodes AHP et TOPSIS ont été couplées pour classer les solutions. Le but de l'optimisation est de déterminer les paramètres de FDM tels que la hauteur de couche, le remplissage de matière, l'orientation de fabrication en fonction du temps de fabrication, de la rugosité et de la dureté.

5.2.4. Conclusion

Cet état de l'art présente différentes méthodes d'aide à la décision multiobjectif et multiattribut. Les différents concepts ont été détaillés et les avantages et limites des différentes méthodes ont été abordés. De plus, un certain nombre de cas d'études se rapprochant du nôtre ont été investigués. À partir de cet état de l'art, et selon la définition de notre problème (section 5.1.3), nous sélectionnons les deux méthodes mises en œuvre dans le modèle hybride proposé en Fig. 5.2.

Choix d'une méthode MODM

En section 5.2.1, plusieurs algorithmes évolutionnaires ont été introduits. La Table 5.1 synthétise les différences entre ces algorithmes dans le contexte du problème de décision présenté.

Table 5.1. Adéquation des algorithmes évolutionnaires pour le problème considéré

	NSGA II [202]	SPEA 2 [196]	SMS-EMOA [197]	MOEA/D [199]
Gestion des objectifs et des contraintes	A posteriori	A posteriori	A posteriori	A priori
Sélection des solutions	Dominance au sens de Pareto	Dominance au sens de Pareto	Indicateur hypervolume	Décomposition
Facilité d'implémentation	++	+	-	-
Diversité des solutions	++	++	+	Selon pondération
Rapidité de calcul	++	+	++	-
Problèmes similaires	Oui	Non	Non	Non

Il apparaît que le NSGA II est l'algorithme le plus adapté pour sélectionner un panel d'alternatives satisfaisantes selon les critères ciblés pour notre problème. Ses applications pour l'optimisation de paramètres de fabrication montrent des performances de calcul et des solutions satisfaisantes [204,207,211]. De plus, il est facilement implémentable et adapté aux problèmes d'optimisation basés sur des modèles d'équations continues et polynomiales.

Choix d'une méthode MADM

La Table 5.2 compare les méthodes MADM introduites en section 5.2.2 selon les besoins de notre problème.

Table 5.2. Adéquation des méthodes MADM pour le problème considéré

	AHP [206]	TOPSIS [215]	TAMARIN [208]
Rapidité de traitement	-	++	++
Pondération interactive	+	-	+++
Gestion de l'incertitude	-	+	++

L'algorithme TAMARIN, du fait de la flexibilité laissée à l'utilisateur, apparaît comme une bonne approche pour aider le décideur à choisir une alternative parmi les alternatives Pareto-optimales.

Les méthodes sur lesquelles baser notre modèle ont été sélectionnées. Nous allons désormais développer un modèle d'aide à la décision pour choisir les paramètres de fabrication du WAAM selon les critères ciblés. Ce modèle est articulé autour du NSGA II et de TAMARIN comme illustré en Fig. 5.5.

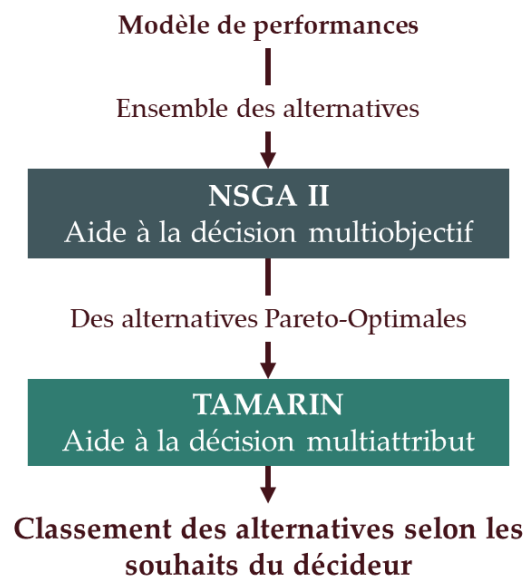
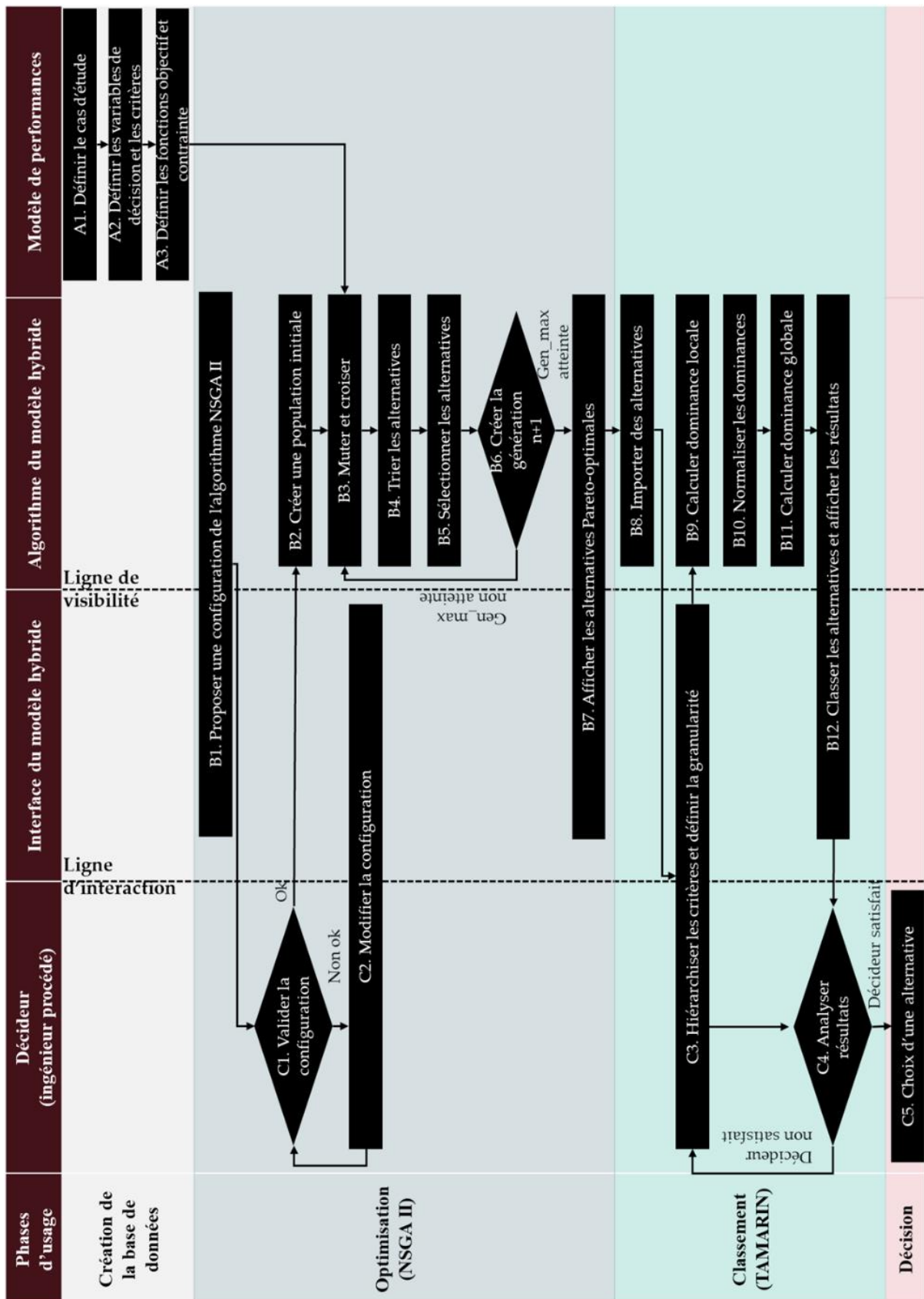


Fig. 5.5. Méthodes d'aide à la décision choisies pour le modèle hybride proposé

5.3. Modèle proposé

La Fig. 5.6 présente le **modèle hybride proposé**. Afin de mettre en avant l'articulation entre l'interface, le décideur et le modèle de performances, le modèle d'aide à la décision proposé est représenté sous forme du *service experience blueprinting* [216]. Les **interactions** et la **visibilité** entre le décideur et le système sont mises en évidence lors de chaque phase d'usage : **création de la base de données**, **optimisation**, **classement** et **décision**. Le fonctionnement du modèle d'aide à la décision est détaillé en « tâches » qui concernent les acteurs : le modèle de performances (A), l'algorithme (B) et le décideur (C).

Fig. 5.6. Modèle d'aide à la décision proposé, sous la forme du *service experience blueprinting*

Modèle de performance (A)

Les étapes A1 à A3 décrivent sommairement la formalisation du problème d'aide à la décision à partir du modèle de performances considéré.

- Le cas d'étude auquel s'applique le modèle de performances est explicité (A1).
- Puis les variables de décisions et les critères sont définis (A2).
- Ces critères sont traduits en fonctions objectif et en fonctions contrainte du système d'aide à la décision (A3). Ces fonctions permettent d'évaluer les critères pour chaque alternative et de préciser les limites du modèle.

Algorithme (B)

Les étapes B1 à B12 détaillent le fonctionnement des algorithmes. Les étapes B1 à B7 constituent l'algorithme NSGA II.

- Tout d'abord, une configuration des paramètres de l'algorithme est proposée (B1). En effet, certains paramètres comme la **taille de la population**, le **nombre d'itérations** et les **paramètres de mutation et de croisements** doivent être définis en amont et affectent la qualité des alternatives Pareto-optimales obtenues ainsi que les performances de l'algorithme.
- Une fois la configuration validée par le décideur, la **population initiale** est créée (B2) : des alternatives sont choisies aléatoirement parmi leur ensemble (défini par les limites du modèle).
- Parmi ces alternatives, certaines sont utilisées pour la mutation. Une alternative mutante est générée en **modifiant une des variables de décisions** la constituant. Certaines autres alternatives sont utilisées pour le croisement : deux alternatives enfants **constituées des variables de deux parents** sont générées (B3).
- Ces alternatives sont **triées et réparties** en fronts de Pareto selon le **principe de dominance** par rapport à l'ensemble des critères évalués grâce au modèle de performances (B4).
- Les meilleures alternatives selon leur rang et leur distance d'encombrement sont **sélectionnées** (B5).
- Une **nouvelle génération** d'alternatives est créée à partir de la sélection réalisée (B6). Ces étapes sont répétées jusqu'à atteindre le nombre de générations maximal. Une fois atteint, les alternatives de la dernière génération appartenant au front de Pareto constituent **les alternatives Pareto-optimales**.

- Celles-ci sont affichées : les paramètres de fabrication correspondant ainsi que les valeurs de performances pour chacun des critères sont détaillés (B7).

Les étapes B8 à B12 détaillent le fonctionnement de l'algorithme TAMARIN.

- Les alternatives Pareto-optimales et leurs performances sont importées (B8).
- La **dominance locale** est calculée : pour chaque critère et alternative, le nombre d'autres alternatives dominées sur le critère est calculé, en prenant en compte la **granularité (%) (celle-ci s'exprime comme un intervalle centrée sur la valeur du critère)** (B9).
- Les dominances locales sont **normalisées** par critère, afin de pouvoir relativiser les écarts (B10).
- Cela permet ensuite de calculer la **dominance globale** de chaque alternative : une **moyenne pondérée** des dominances locales normalisées (par critère), en fonction de la hiérarchisation, est réalisée (B11).
- Enfin les alternatives sont **classées** selon leur dominance globale et affichées (B12).

Décideur (C)

Les étapes C1 à C5 décrivent l'interaction entre le modèle et le décideur.

- Tout d'abord, le décideur valide la configuration proposée pour l'algorithme NSGA II. Si le décideur est satisfait de la configuration proposée par défaut, ou ne souhaite pas approfondir ce sujet, la configuration proposée par le modèle est validée (C1).
- Si le décideur le souhaite, il peut modifier la configuration (C2).
- Après la génération des solutions Pareto-optimales, le décideur définit l'**importance relative des critères et leur granularité** (C3).
- Selon le résultat donné par le modèle le décideur **itère** avec l'algorithme pour **affiner son choix** (C4).
- Quand il est satisfait, **il choisit la solution proposée** (C5) et l'algorithme d'aide à la décision prend fin.

Les détails de l'implémentation des algorithmes sont présentés dans la section suivante.

5.4. Implémentation du modèle

5.4.1. Définition des variables

Tout d'abord, nous définissons les variables utilisées.

NSGA II

Les variables relatives au problème	
Symbole	Description
<i>nVar</i>	nombre de variables de décision
<i>VarMin</i>	vecteur contenant les limites inférieures des variables de décision
<i>VarMax</i>	vecteur contenant les limites supérieures des variables de décision
<i>Varstep</i>	vecteur contenant les pas des variables de décision

La configuration de l'algorithme NSGA II	
Symbole	Description
<i>MaxIt</i>	nombre d'itération ou nombre de génération
<i>nPop</i>	nombre d'individus de la population
<i>pcrossover</i>	probabilité de croisement
<i>pmutation</i>	probabilité de mutation
<i>mu</i>	taux de mutation
<i>sigma</i>	pas de mutation

L'algorithme d'optimisation basé sur le NSGA II utilise des structures. Une structure est un tableau permettant de stocker des vecteurs dans chaque case. Les données sont stockées ligne par ligne. Une donnée, en ligne, est donc caractérisée par ses champs, en colonnes.

Les structures et leurs champs	
Symbole	Description
<i>pop</i>	structure contenant les individus
<i>popenfants</i>	structure contenant les individus croisés
<i>popmutants</i>	structure contenant les individus mutés
<i>alternative</i>	champ contenant le vecteur variables de décision
<i>fitness</i>	champ contenant le vecteur objectif
<i>constraint</i>	champ contenant le vecteur contrainte
<i>rank</i>	champ contenant le rang
<i>domination set</i>	champ contenant les alternatives dominées
<i>dominated count</i>	champ contenant le compte de domination
<i>crowding distance</i>	champ contenant la distance d'encombrement
<i>gen</i>	champ contenant la génération d'apparition

Les compteurs utilisés dans les itérations	
Symbole	Description
i	compteur d'individus de la population
k	compteur de croisements et de mutations
it	compteur de génération

TAMARIN

Les données d'entrée	
Symbole	Description
m	nombre d'alternatives considérées
n	nombre de critères considérés
V_{mn}	Valeur du critère n de l'alternative n
y_n	granularité du critère n
z_n	pondération du critère n

Algorithme principal	
Symbole	Description
$Intervalle_inf_ab$	intervalle de granularité inférieur du critère a de l'alternative b
$Intervalle_sup_ab$	intervalle de granularité supérieur du critère a de l'alternative b
max_a	valeur maximale du critère a parmi l'ensemble des alternatives
min_a	valeur minimale du critère a parmi l'ensemble des alternatives
max_dom_a	valeur maximale de dominance locale du critère a
min_dom_a	valeur minimale de dominance locale du critère a
dom_locale_ab	dominance locale du critère a de l'alternative b
$dom_normalisée_ab$	dominance normalisée du critère a de l'alternative b
$dom_globale_b$	dominance globale de l'alternative b
$score_b$	score de l'alternative b

Les compteurs utilisés dans les itérations	
Symbole	Description
a	compteur de critères
b	compteur d'alternatives
j	compteur secondaire d'alternatives

Les principaux paramètres et noms de variables de l'algorithme ont été définis. Dans la suite de cette section, les algorithmes NSGA II et TAMARIN sont explicités en pseudocode.

5.4.2. Implémentation de NSGA II

Le fonctionnement général du code NSGA II a été présenté sommairement en sections 5.2.1 et 5.3. Nous allons détailler ici l'implémentation réalisée dans le contexte de nos travaux.

L'optimisation avec l'algorithme NSGA II a été adaptée à partir du code développé par Heris [217]. Le code initial a été adapté au cas d'application présenté, notamment pour intégrer la

gestion de fonction contrainte et la discrétisation des variables. L'ensemble des opérations sont réalisées de manière vectorielle avec notamment des opérations scalaires (représentées par $.$). Ainsi, n'importe quel nombre de variables de décision peut être considéré. L'ensemble du code Matlab est fourni en Annexe 5.A.

Données d'entrées

Au niveau algorithmique, les fonctions objectifs et contraintes (contenant les équations liant les critères aux variables de décision) sont définies par les vecteurs $nVar$, $VarMin$, $VarMax$, $Varstep$. La configuration de l'algorithme est définie en précisant $MaxIt$, $nPop$, $pcrossover$, $pmutation$, mu , $sigma$.

Une structure vide, nommée pop , est créée (1-2).

Création de la structure vide

$pop = \text{structure}(nPop, 8)$ (1)

$pop = (\text{Alternative}, \text{Fitness}, \text{Constraint}, \text{Rank}, \text{DominationSet}, \text{DominatedCount}, \text{CrowdingDistance}, \text{Gen})$ (2)

Création de la population initiale

Puis cette structure est remplie grâce à une boucle *tant que* en choisissant aléatoirement des individus parmi la population (3-12). La structure pop est ensuite remplie pour chaque individu i de la population (5-8). Enfin, on s'assure que la ligne créée est bien unique avant de passer à la suivante (9-12).

Remplissage de la structure avec la population initiale

Tant que $i \leq nPop$ (3)

$l = \text{fonction de génération d'un nombre aléatoire selon la loi de distribution uniforme discrète}(\text{VarStep}, \text{VarSize})$ (4)

#un vecteur l contenant une valeur aléatoire de chaque variable de décisions est créé

$pop(i).\text{Alternative} = l$ (5)

$pop(i).\text{Fitness} = \text{Fonction_objectif}(pop(i).\text{Alternative})$ (6)

$pop(i).\text{Constraint} = \text{Fonction_contrainte}(pop(i).\text{Alternative})$ (7)

$pop(i).\text{Gen} = 1$ (8)

si $pop(i)$ est unique (9)

$i = i + 1$ (10)

fin si (11)

fin tant que (12)

Croisement et mutation

Pour chaque génération, le nombre de croisements et de mutations réalisés dépend des pourcentages $pcrossover$ et $pmutation$.

Pour chaque croisement, deux parents sont sélectionnés aléatoirement dans la population initiale (14-15). Pour chaque couple de parents, leurs gènes sont répartis aléatoirement et proportionnellement entre les deux enfants grâce au vecteur $alpha$ (16-18). Cette méthode, dite de croisement binaire simulé, est celle utilisée dans l'algorithme original [202]. Puis, on

s'assure que les gènes des enfants sont conformes à la discrétisation (19-20). Après avoir vérifié que les deux enfants créés sont uniques dans cette génération (21-24), ils sont stockés dans une structure propre *popenfant* (21). Puis, le prochain croisement est initié (13).

Fonction croisement

tant que $k \leq (pcrossover * nPop / 2)$ (13)

parent 1 = sélection aléatoire d'un individu dans la population (14)

parent 2 = sélection aléatoire d'un individu dans la population (15)

vecteur alpha = vecteur de taille égal au nombre de variables de décisions, rempli de valeurs aléatoires entre 0 et 1 (16)

gènes enfant 1 = *vecteur alpha* .* *gènes parent 1* + *vecteur 1-alpha* .* *gènes parent 2* (17)

gènes enfant 2 = *vecteur alpha* .* *gènes parent 2* + *vecteur 1-alpha* .* *gènes parent 1* (18)

gènes enfant 1 = arrondi (*gènes enfant 1*, *VarStep*) (19)

gènes enfant 2 = arrondi (*gènes enfant 2*, *VarStep*) (20)

si *enfant 1* et *enfant 2* sont uniques dans *pop enfants* (21)

popenfants = *popenfants* + *enfant 1* + *enfant 2* (22)

$k=k+1$ (23)

fin si (24)

fin tant que (25)

Pour chaque mutation, un individu à faire muter est sélectionné aléatoirement dans la population (27). Le nombre de gènes à faire muter est déterminé en fonction du taux de mutation, *mu* (28). La sélection du gène (ou des gènes) à faire muter parmi les gènes de l'individu est déterminée aléatoirement avec le *vecteur gamma* (29). Le gène (ou les gènes) muté(s) est (sont) calculé(s) à partir de la force de mutation, *sigma*, du pas des variables, *VarStep* et du *vecteur gamma* (30). Ce système de mutation est la mutation polynomiale, couramment utilisée avec le NSGA II [202]. Puis, on s'assure que les gènes mutés sont conformes à la discrétisation (31). Après avoir vérifié l'unicité du mutant créé dans cette génération, le mutant est ajouté à la structure *popmutant* (32-35). Enfin, la prochaine mutation est initiée (26).

Fonction mutation

tant que $k \leq (pmutation * nPop)$ (26)

mutant = sélection aléatoire d'un individu (27)

n = nombre de variables à muter = $mu * \text{nombre de variables}$ (arrondi à l'entier sup) (28)

vecteur gamma = vecteur de taille n contenant les indices des variables à muter, définis aléatoirement (29)

mutant = *mutant* + $sigma * \text{pas des variables}$.* *vecteur gamma* (30)

mutant = arrondi (*mutant*, *VarStep*) (31)

si *mutant* est unique dans *popmutants* (32)

popmutants = *popmutants* + *mutant* (33)

$k=k+1$ (34)

fin si (35)

fin tant que (36)

Les performances des nouvelles alternatives sont évaluées avec les fonctions contrainte et objectif. Le compteur générationnel est incrémenté. Puis, une nouvelle population contenant l'ancienne génération et la nouvelle est créée et stockée dans *pop*.

Tri et sélection

Les individus de *pop* sont répartis en front de Pareto selon leur rang. Le rang est déterminé par tournois de sélection binaire : chaque individu est comparé aux autres individus de la population un à un, selon l'ensemble des critères (*fitness* et *constraints*). Puis la distance d'encombrement est calculée. Les individus sont triés dans les fronts de Pareto selon leur rang et sont classés par distance d'encombrement. Les fonctions utilisées sont celles décrites par Deb *et al.* [202]. Les éléments de *pop* sont donc classés par front dans l'ordre croissant (le premier front est le meilleur) et par distance d'encombrement dans l'ordre croissant (la plus faible distance est la meilleure). Selon ce classement, les *nPop* premières alternatives sont conservées pour l'itération suivante.

Itération

Les opérations de croisement et mutation, de tri et de sélection se succèdent jusqu'à obtenir les *nPop* solutions de la génération *MaxIt* (37-43).

Itération

```

pour it allant de 1 à MaxIt (37)
    popenfants = Fonction croisement (38)
    popmutants = Fonction mutation (39)
    pop = pop + popenfants + popmutants (40)
    pop = tri et sélection (pop, nPop) (41)
    it = it + 1 (42)
fin pour (43)

```

Données de sortie

En sortie du programme, les alternatives Pareto-optimales, appartenant au premier front de Pareto, sont stockées dans un fichier texte (format CSV, codé en UTF-8) pour être traitées par TAMARIN.

5.4.3. Implémentation de TAMARIN

Pour TAMARIN, le code originel a été utilisé [208]. Il a été réalisé sur GitHub en Javascript.

Données d'entrée

Le décideur doit tout d'abord charger le fichier contenant les alternatives (solutions Pareto-optimales) évaluées par rapport aux critères de décision considérés. Pour faire le lien entre les deux algorithmes, le fichier texte issu du NSGA II est importé sur l'interface¹³. La Table 5.3 illustre le format du fichier de données d'entrées pour deux paramètres de fabrication et quatre critères, en colonnes. Chaque ligne représente une alternative. Les colonnes sont séparées par

¹³ TAMARIN est accessible librement via ce [lien](https://dhmmasson.github.io/rezbuild-emperor-tamarin/static/) : <https://dhmmasson.github.io/rezbuild-emperor-tamarin/static/>

des virgules. La mention (*DESC*) après un critère précise qu'il doit être minimisé (et non maximisé, par défaut).

Table 5.3. Illustration du format des données d'entrées de TAMARIN

Paramètre 1	Paramètre 2	Critère 1	Critère 2	Critère 3(DESC)	Critère 4 (DESC)
x	x	x	x	x	x
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Interface

TAMARIN possède une interface sous forme d'une application hébergée sur un serveur. L'interface se compose de deux parties.

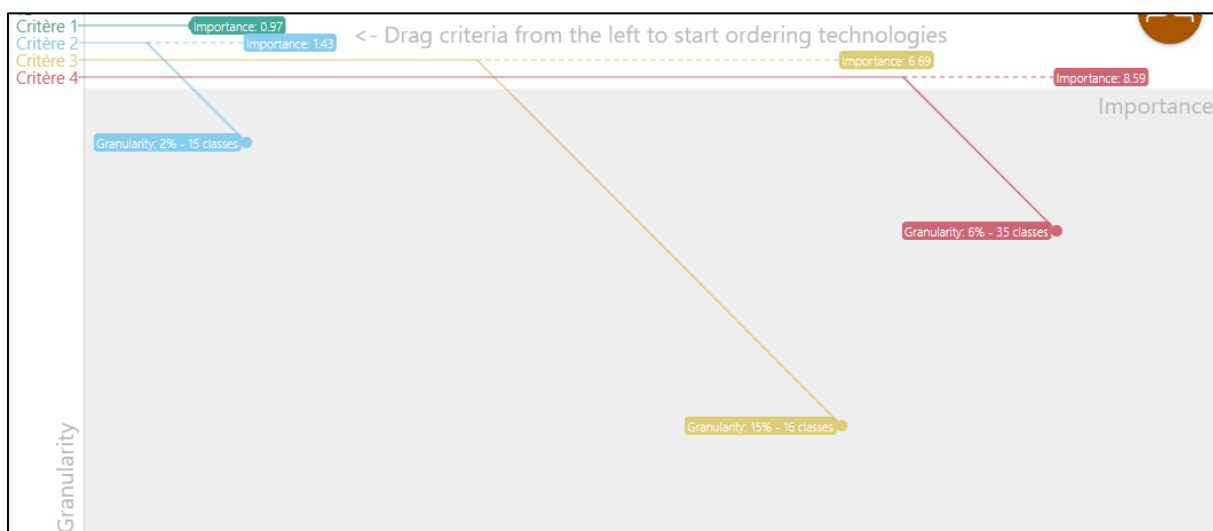


Fig. 5.7. Interface de l'algorithme TAMARIN : hiérarchisation et granularité

La Fig. 5.7 illustre l'interaction entre le décideur et l'algorithme. Les critères peuvent être déplacés sur l'axe horizontal afin de les hiérarchiser. **Cet axe permet au décideur de définir l'importance des critères sur une plage continue relative entre 0 (à gauche) et 10 (à droite). Sur l'axe horizontal, le décideur peut attribuer une granularité de 0% (en haut) à 20% (en bas).**

La Fig. 5.8 présente l'affichage des solutions. Chaque ligne correspond à une alternative. Celles-ci sont définies selon les valeurs des variables de décision précisées dans la colonne *technology*. En colonne, le score global et le score de chaque critère sont présentés sous forme d'échelle à onze niveaux, entre zéro et cinq, en forme d'étoile. En positionnant la souris sur l'échelle, les valeurs exactes sont détaillées.



Fig. 5.8. Interface de l'algorithme TAMARIN : classement et affichage des solutions

Le classement des solutions (la meilleure en haut) évolue simultanément selon la hiérarchisation (ou pondération) des critères et de la granularité. Ce classement est calculé selon le score dont le calcul est explicité ci-dessous, en pseudocode.

Calcul des dominances locales

Chacune des m alternatives est caractérisée par la performance V_{mn} pour chacun des n critères pondérés. Pour chaque critère, une granularité y_n est définie entre 0 et 0,2 (elle est limitée à 0,2 afin de ne pas prendre l'ascendant sur la hiérarchisation des critères). Une pondération z_n , entre 0 et 10, est attribuée à chaque critère.

L'algorithme calcule les intervalles de granularité de chaque critère (1-6). Les intervalles sont exprimés selon l'écart entre les valeurs minimales et maximales de chaque critère. **La granularité est relative**, par rapport à la plage de valeurs de chaque critère.

Calcul intervalles de granularité

```

pour a allant de 1 à n #boucle des critères (1)
  pour b allant de 1 à m #boucle des alternatives (2)
    Intervalle_inf_ab =  $V_{ab} - y_a \times (max_a - min_a)$  (3)
    Intervalle_sup_ab =  $V_{ab} + y_a \times (max_a - min_a)$  (4)
  fin pour (5)
fin pour (6)

```

Puis, la dominance locale est calculée (7-20). Pour chaque critère de chaque alternative, on compte combien d'autres alternatives sont dominées par ce critère (12, 15). Pour les critères à maximiser, une alternative domine l'autre si elle est supérieure (en prenant en compte l'intervalle de granularité) (11). Pour les critères à minimiser, une alternative domine l'autre si elle est inférieure (en prenant en compte l'intervalle de granularité) (14).

Calcul des dominances locales

```

pour a allant de 1 à n #boucle des critères (7)
  pour b allant de 1 à m #boucle des alternatives (8)
    pour j allant de 1 à m #boucle des alternatives (9)
      si critère a à maximiser (10)
        si Intervalle_inf_ab > Intervalle_sup_j (11)
          dom_locale_ab = dom_locale + 1 (12)

```

```

                fin si (10)
            sinon (14)
                si Intervalle_sup_ab < Intervalle_inf_aj (14)
                    dom_locale_ab = dom_locale +1 (15)
                fin si (16)
            fin si (17)
        fin pour (18)
    fin pour (19)
fin pour (20)

```

Normalisation des critères

La dominance locale est normalisée afin d'atténuer les effets de la granularité des différents critères et pouvoir réaliser des opérations sur les nombres de dominance (21-27).

Normalisation

```

pour a allant de 1 à n #boucle des critères (21)
    min_dom_a = minimum (dom_locale_a) (22)
    max_dom_a = maximum (dom_locale_a) (23)
    pour b allant de 1 à m #boucle des alternatives (24)
        dom_normalisée_ab = (dom_locale_ab - min_dom_a) / (max_dom_a - min_dom_a) (25)
    fin pour (26)
fin pour (27)

```

Calcul des dominances globales

Enfin, la dominance globale est égale à la moyenne pondérée des dominances locales normalisées, selon les valeurs de hiérarchisation des critères. Un score final correspondant à la dominance globale est ainsi obtenu pour chaque alternative selon la hiérarchisation et la granularité attribuées à chaque critère (28-36).

Calcul dominance global

```

pour b allant de 1 à m #boucle des alternatives (28)
    score_b = 0 (29)
    somme des pondérations = 0 (30)
    pour a allant de 1 à n #boucle des critères (31)
        score_b = score_b + dom_normalisée_ab x Z_a (32)
        somme des pondérations = somme des pondérations + Z_a (33)
    fin pour (34)
    score_b = score_b / somme des pondérations (35)
fin pour (36)

```

Données de sorties

En fonction de ce score, les alternatives sont classées. Les rangs de chaque critère sont affichés et les valeurs sont affichables. À partir de l'affichage, le décideur peut sélectionner une alternative qui lui convient.

5.5. Application du modèle pour le choix des paramètres de fabrication

5.5.1. Données considérées

Le modèle hybride d'aide à la décision proposé est appliqué au cas d'étude. Nous étudions ici la fabrication en WAAM-CMT d'une pièce en acier 316L représentée par un mur de dimensions 2,5 mm x 160 mm x 180 mm. Le problème d'aide à la décision pour le choix des paramètres en fonction des performances mécaniques et industrielles durables est formalisé en section 5.1.2.

Les paramètres de fabrications constituant les variables de décision sont WFS et TS. Les valeurs de WFS considérées sont comprises entre 5 m/min et 10 m/min avec un pas de 0,1 m/min soit 51 valeurs possibles. Les valeurs de TS considérées sont comprises entre 0,60 et 0,90 m/min avec un pas de 0,006 m/min soit 51 valeurs possibles. Ainsi, le nombre total d'alternatives du problème considéré est de 2 601 combinaisons de paramètres de fabrication. Pour choisir une alternative selon les fonctions objectif et contrainte, le modèle hybride développé ci-dessus est appliqué.

5.5.2. Sélection des alternatives Pareto-optimales : NSGA II

Configuration de l'algorithme

MaxIt (nombre de générations du NSGA II) et *nPop* (nombre d'individus par génération) dépendent du problème considéré. Dans notre étude, différentes valeurs de *MaxIt* ont été testées. L'algorithme converge à partir de cinq itérations. *MaxIt* a été défini à 20 pour garder une marge satisfaisante et assurer une convergence et une diversité des solutions. *nPop* a été défini à 50 individus afin d'obtenir un sous-ensemble significatif par rapport au nombre total de solutions Pareto-optimales du problème (cf. section 5.5.2). La définition de ces variables et leurs impacts sur la qualité des solutions obtenues ainsi que sur le temps de calcul est une perspective à développer dans de futurs travaux.

Ces autres valeurs sont considérées : $p_{crossover} = 0,7$; $p_{mutation} = 0,4$, $\mu = 0,02$ et $\sigma = 0,1$. À noter que dans notre cas, avec deux variables de décision, μ n'a pas d'impact : le nombre de gènes à muter sera toujours un.

Résultats de l'optimisation

L'algorithme NSGA II a permis d'obtenir 50 individus appartenant au front de Pareto, soit 50 solutions Pareto-optimales de notre problème. Ces solutions remplissent chacune la contrainte de force maximale admissible. Par définition, il n'est pas possible d'obtenir des solutions avec de meilleures performances pour un des quatre critères sans dégrader la performance d'au

moins un des autres critères. La Fig. 5.9 illustre les solutions obtenues et les fronts de Pareto pour les quatre critères, deux à deux.

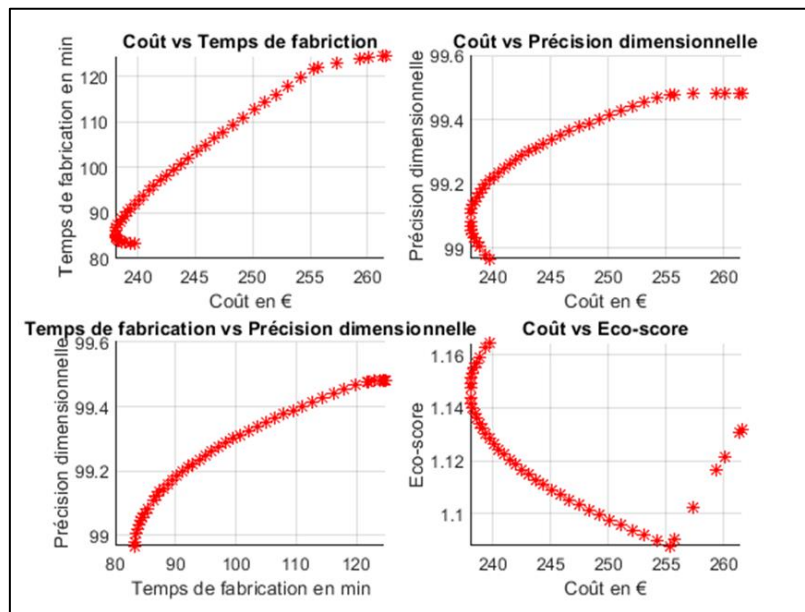


Fig. 5.9. Représentation graphique des solutions Pareto-optimales obtenues par l'algorithme NSGA II. L'algorithme a permis d'obtenir les solutions en 8,5 secondes. Le fichier texte contenant les solutions est fourni en Annexe 5.B.

Validation des résultats

La taille restreinte de l'espace des solutions de notre cas d'application permet de calculer les performances de l'ensemble de la population. La Fig. 5.10 présente l'ensemble des alternatives existantes dans notre problème selon les critères observés deux à deux.

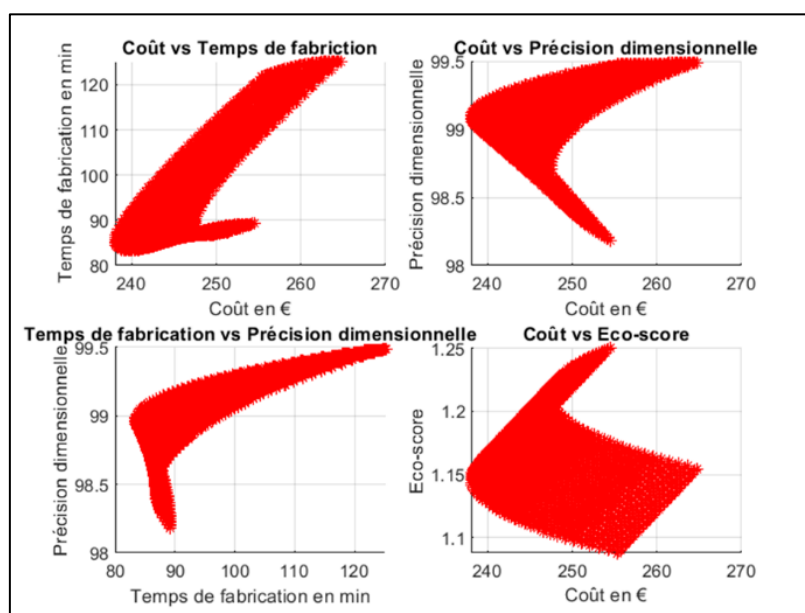


Fig. 5.10. Ensemble des alternatives admissibles pour le cas d'étude considéré

L'ensemble des alternatives a été trié et sélectionné selon les méthodes utilisées dans le NSGA II. La Fig. 5.11 illustre l'ensemble des solutions Pareto-optimales du problème. Ainsi, il est possible de comparer les solutions du NSGA II (Fig. 5.9) avec l'ensemble des solutions Pareto-optimales (Fig. 5.11). Les solutions sélectionnées par l'algorithme NSGA II font bien partie de l'ensemble des solutions Pareto-optimales.

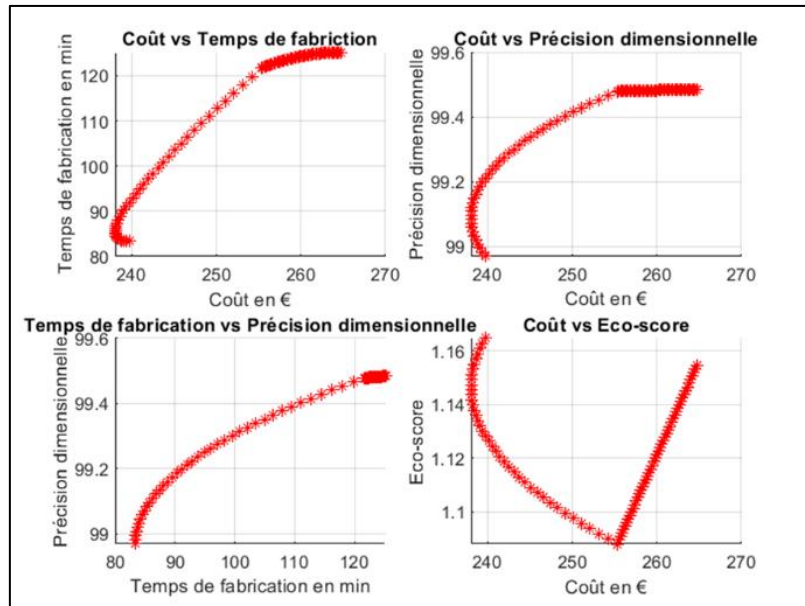


Fig. 5.11. Ensembles des solutions Pareto-optimales pour le cas d'étude considéré

Le temps de calcul des solutions sans le NSGA II est de 161 s (dans les mêmes conditions de calcul que précédemment). Pour un problème de dimension réduite, tel que présenté ici (avec deux paramètres de fabrication considérés), **le gain de temps est déjà significatif.**

L'algorithme NSGA II, tel qu'implémenté, permet donc de converger rapidement vers les solutions Pareto-optimales, en assurant la diversité de ces solutions.

Discussion des résultats obtenus

Les solutions Pareto-optimales obtenues comprennent les valeurs optimales de chaque critère (cf. Table 4.21). Le temps de fabrication est compris entre 85 et 122 minutes. Le coût de fabrication varie entre 238 et 262 €. L'éco-score varie entre 1,08 et 1,17 Pts. La précision dimensionnelle est comprise entre 99 et 99,5% (soit une différence moyenne comprise entre 1,6 et 0,8 mm d'écart entre la pièce fabriquée et la CAO). Dû aux divergences entre les critères, les fronts de Pareto, présentés en Fig. 5.9, illustrent les difficultés de choix d'une alternative parmi ce sous-ensemble de solutions non dominées. Graphiquement, on observe qu'un coût optimal (minimal) est généralement lié à un temps de fabrication optimal (minimal). Mais une précision dimensionnelle optimale (maximale) est atteinte pour les coûts et les temps de fabrication les plus élevés. L'éco-score optimal (minimal) correspond à un coût moyen.

La Fig. 5.12 permet d'analyser les valeurs de WFS et TS pour les alternatives Pareto-optimales obtenues. Ces valeurs varient entre 5 et 9 m/min pour WFS. Cela semble indiquer qu'un WFS

trop élevé (> 9 m/min) n'est pas souhaitable. Pour TS, les alternatives Pareto-optimales se répartissent entre 0,6 et 0,9 m/min, les bornes de notre étude. La répartition des alternatives dans cette cartographie révèle qu'une variation de TS n'est intéressante que pour un WFS = 5 m/min. De même, une variation de WFS n'est intéressante que pour TS = 0,9 m/min.

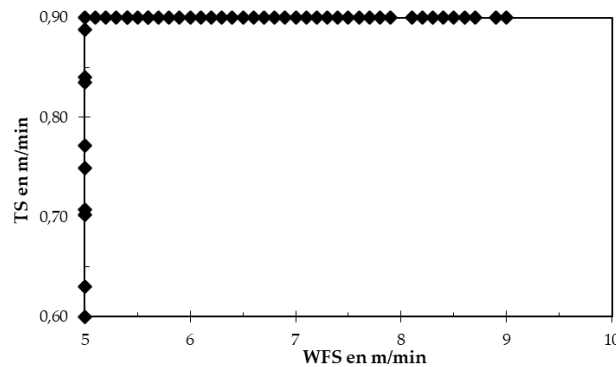


Fig. 5.12. Cartographie des alternatives Pareto-optimales par rapport à WFS et TS

L'analyse des alternatives Pareto-optimales reflète donc la divergence de choix des paramètres de fabrication selon les critères et la difficulté d'appréhender ces résultats pour le décideur, afin de choisir une alternative. L'application de TAMARIN permet d'adresser cela.

5.5.3. Classement des alternatives : TAMARIN

À partir des solutions Pareto-optimales obtenues par NSGA II, la méthode TAMARIN permet au décideur de classer les alternatives en fonction d'un contexte donné, de l'expertise et besoins du décideur (hiérarchisation et granularité des critères).

Pour illustrer son fonctionnement et les résultats obtenus, **trois scénarios ont été définis**. Chaque scénario présente un contexte différent avec différentes hiérarchies et granularités des critères. Les scénarios présentés sont illustratifs et s'appuient sur la **même base de données** d'entrée contenant les alternatives Pareto-optimales de notre application.

Premier scénario

Le premier scénario est la fabrication d'une pièce de série, de grande dimension, de géométrie simple, pour l'industrie aéronautique. L'ingénieur procédé doit s'assurer de la conformité de la pièce. Cependant la géométrie étant simple, la reprise en usinage sera aisée. Ainsi, la précision dimensionnelle de la pièce n'est pas le critère le plus important ici. Le coût de fabrication et le temps de fabrication sont les critères les plus importants. De plus, pour maîtriser avec précision le procédé de fabrication, leur granularité sera nulle. L'ingénieur choisit de ne pas considérer l'impact environnemental dans son classement.

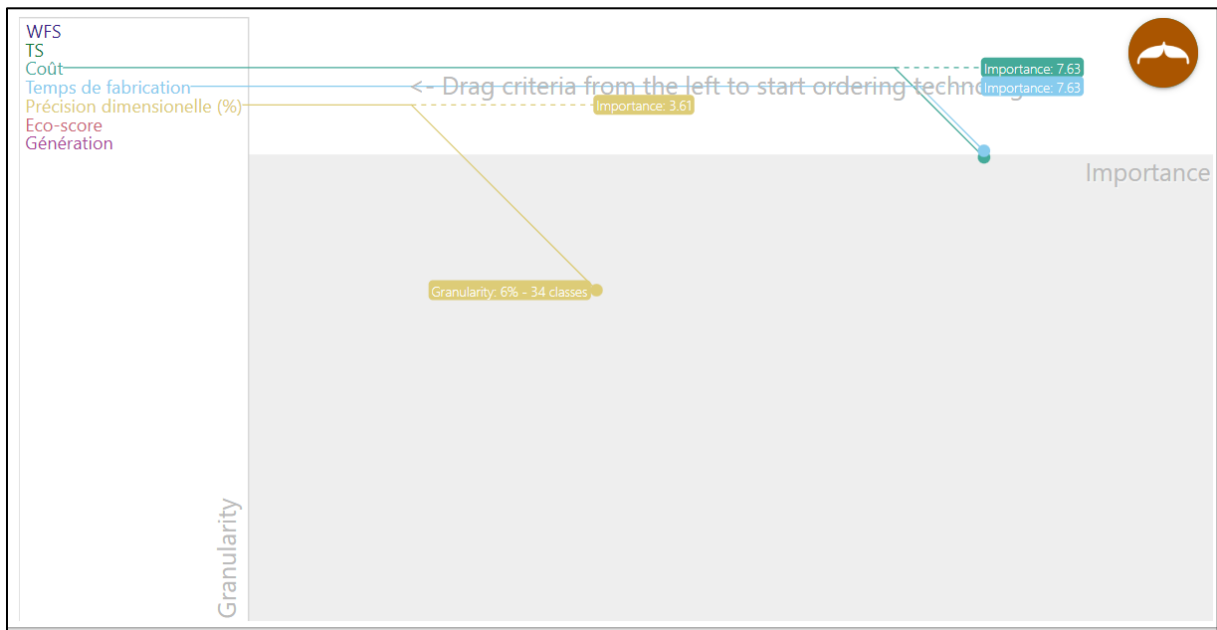


Fig. 5.13. Hiérarchisation et granularité des critères pour le scénario 1

La Fig. 5.13 illustre l’interface TAMARIN pour le scénario présenté. Le critère éco-score n’est pas utilisé. La Table 5.4 présente les cinq premières alternatives proposées par l’interface. Dans cette configuration, la meilleure alternative donne WFS = 8,1 m/min et TS = 0,9 m/min. La Fig. 5.14 illustre le rendu des solutions sur l’interface.

Table 5.4. Liste des cinq meilleures alternatives pour le scénario 1

WFS (m/min)	TS (m/min)	Score	d% (%)	t _f (min)	C _f (€)
8,1	0,90	0,76	99,08	85	238,1
8,2	0,90	0,76	99,07	85	238,1
7,9	0,90	0,75	99,11	85	238,1
8,3	0,90	0,75	99,06	86	238,2
8,4	0,90	0,74	99,04	84	238,3

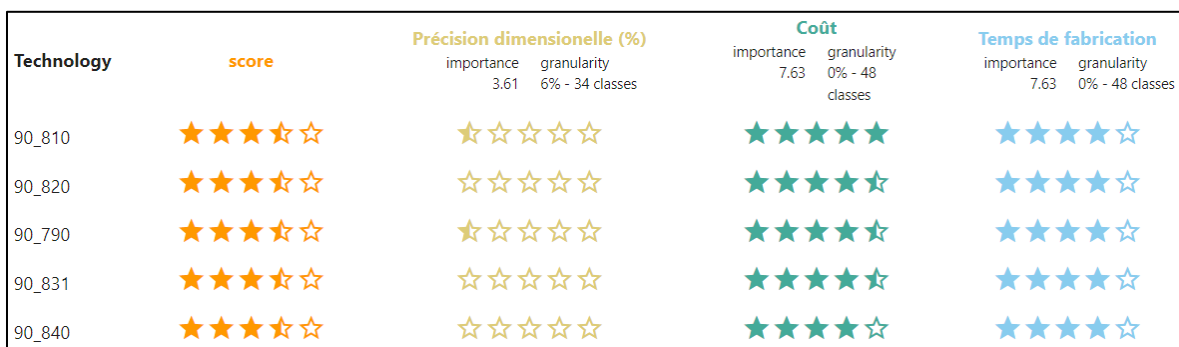


Fig. 5.14. Classement des meilleures alternatives sur l’interface TAMARIN selon le scénario 1

Deuxième scénario

Le deuxième scénario est la fabrication d'une pièce en très petite série, de grande dimension, de géométrie complexe, réalisée dans une démarche d'éco-conception pour réduire les impacts de la pièce tout au long du cycle de vie. Ici, la précision dimensionnelle est importante, car la reprise en usinage est moins aisée due à la complexité de la pièce. La variation de la précision dimensionnelle étant faible (la pièce étant de grande dimension), la granularité est maintenue à 0 %. En lien avec la démarche d'éco-conception, l'éco-score est également un critère important. Une granularité de 5 % est choisie pour compenser les incertitudes de calcul liées aux données utilisées dans l'ACV. La pièce étant fabriquée en petite série, le temps de fabrication est moins important pour l'ingénieur que le coût de la pièce. La granularité de ces deux critères est définie à 0 % pour les prendre en compte précisément dans l'étude. La Fig. 5.15 illustre l'interface TAMARIN pour ce scénario.

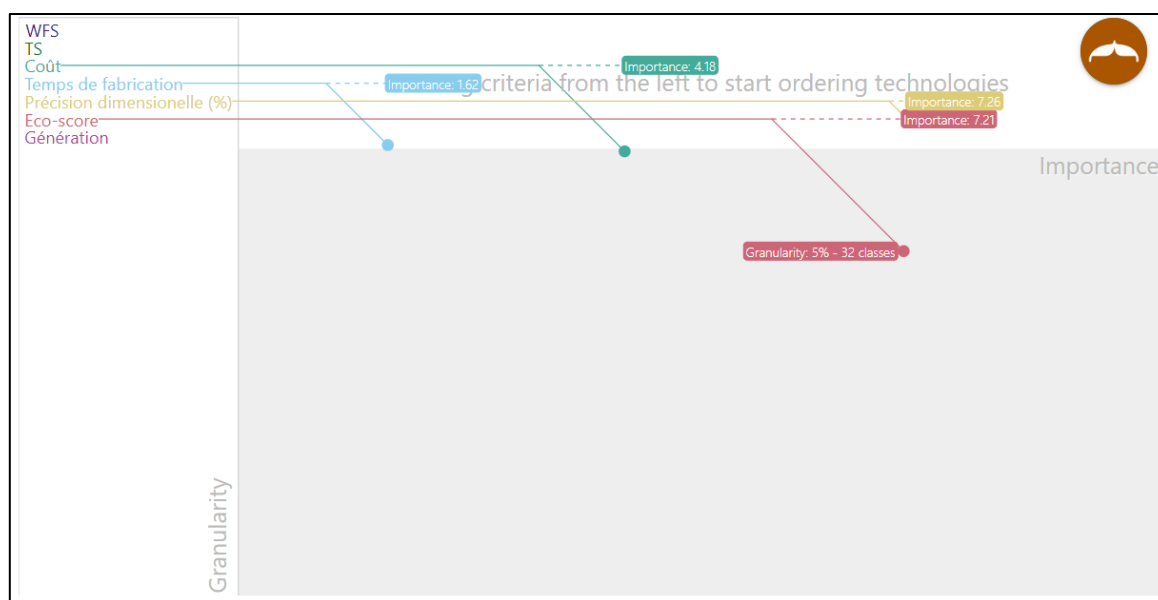


Fig. 5.15. Hiérarchisation et granularité des critères pour le scénario 2

La Table 5.5 présente les cinq premières alternatives proposées par l'interface. Dans cette configuration, la meilleure alternative est WFS = 5 m/min et TS = 0,9 m/min. La Fig. 5.16 illustre le rendu des solutions sur l'interface.

Table 5.5. Liste des cinq meilleures alternatives pour le scénario 2

WFS (m/min)	TS (m/min)	Score	$d\%$ (%)	t_f (min)	C_f (€)	<i>Eco – score</i> Pts
5,0	0,90	0,70	99,48	122	255,3	1,088
5,0	0,89	0,69	99,48	122	255,7	1,091
5,1	0,90	0,69	99,47	120	254,2	1,090
5,2	0,90	0,67	99,45	118	253,1	1,092
5,3	0,90	0,65	99,44	116	252,1	1,094

Technology	score	Temps de fabrication		Coût		Eco-score		Précision dimensionnelle (%)	
		importance	granularity	importance	granularity	importance	granularity	importance	granularity
		1.62	0% - 48 classes	4.18	0% - 48 classes	7.21	5% - 32 classes	7.26	0% - 48 classes
90_500	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
89_500	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
90_510	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
90_520	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
90_530	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
90_540	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆

Fig. 5.16. Classement des meilleures alternatives sur l'interface TAMARIN selon le scénario 2

Troisième scénario

Le troisième scénario est une évolution du scénario précédent. Suite à la réussite de la fabrication de la première série de pièces, une grande série de la même pièce est réalisée. L'importance du temps de fabrication et du coût est augmentée sans modifier l'importance des deux autres critères. La reprise en usinage s'est avérée moins complexe que prévu sur les pièces réalisées. Sans changer l'importance de la précision dimensionnelle, sa granularité est augmentée, car elle s'avère moins impactante. En raison des incertitudes sur le modèle de coût, la granularité de ce critère est augmentée. La Fig. 5.17 illustre l'interface TAMARIN pour ce scénario.

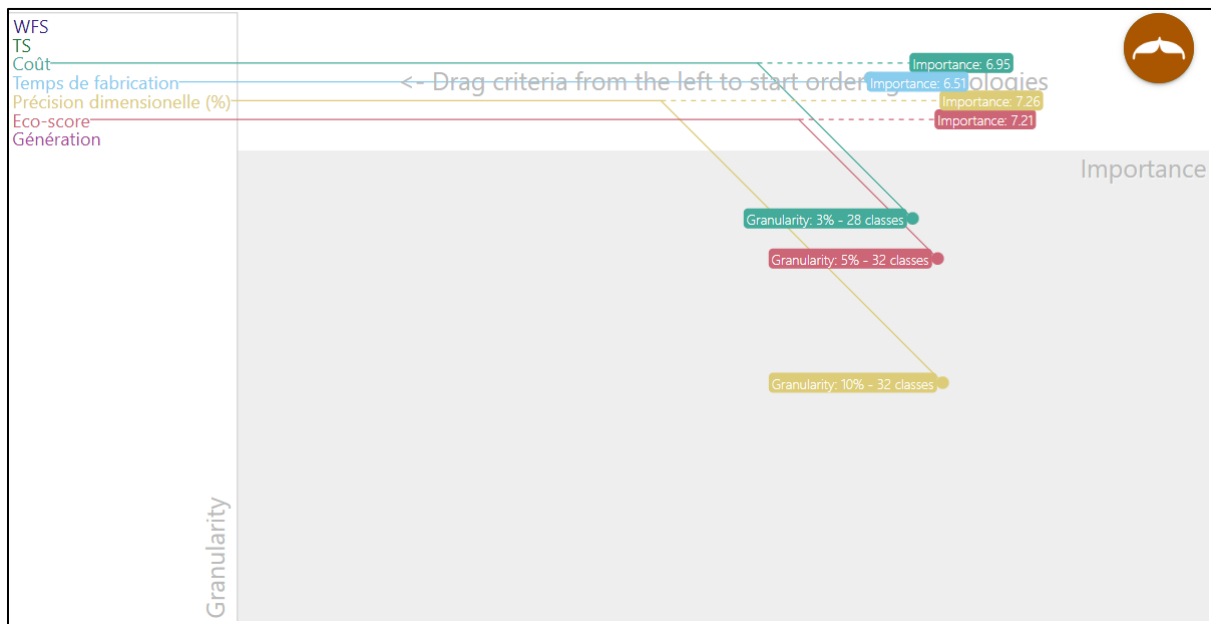


Fig. 5.17. Hiérarchisation et granularité des critères pour le scénario 3

La Table 5.6 présente les cinq premières alternatives proposées par l'interface. Dans cette configuration, la meilleure alternative donne WFS = 5 m/min et TS = 0,9 m/min. La Fig. 5.18 illustre le rendu des solutions sur l'interface.

Table 5.6. Liste des cinq meilleures alternatives pour le scénario 3

WFS m/min	TS m/min	Score	$d\%$ (%)	t_f (min)	C_f (€)	<i>Eco – score</i> Pts
5,0	0,90	0,61	99,48	122	255,3	1,088
5,8	0,90	0,60	99,38	108	247,4	1,103
5,1	0,90	0,60	99,47	120	254,2	1,090
5,2	0,90	0,60	99,45	118	253,1	1,092
5,6	0,90	0,60	99,40	111	249,1	1,099

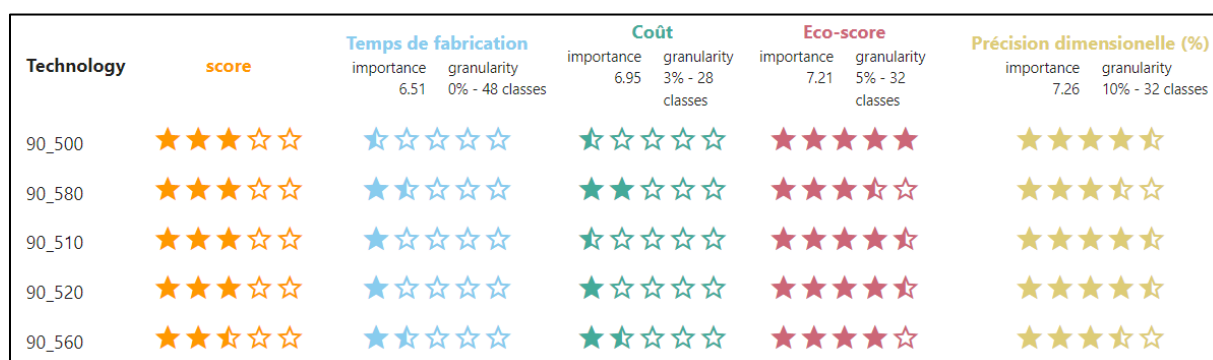


Fig. 5.18. Classement des meilleures alternatives sur l'interface TAMARIN selon le scénario 3

Afin d'aider à la compréhension des calculs réalisés par l'algorithme, l'Annexe 5.C présente le détail du calcul des variables de l'algorithme pour chacune des cinq meilleures alternatives du scénario 3 selon le pseudo-code explicité en section 5.4.3.

Discussion des résultats obtenus

La Table 5.7 présente les deux alternatives les mieux classées pour chaque scénario. Pour l'ensemble des scénarios, un **TS proche de 0,9 m/min** est indiqué. Les valeurs de **WFS varient entre 5 et 8 m/min** entre le scénario 1 et les scénarios 2 et 3. Pour le scénario 3, le décideur observe qu'une augmentation de WFS permet de réduire le temps de fabrication et le coût de fabrication avec un impact modéré sur la précision dimensionnelle et l'éco-score. Selon ses attentes, il pourra choisir l'une ou l'autre alternative.

Table 5.7. Comparaison des meilleures alternatives par scénario

Scénario	WFS m/min	TS m/min	$d\%$ (%)	t_f (min)	C_f (€)	<i>Eco – score</i> Pts
1	8,1	0,90	99,08	85	238,1	-
	8,2	0,90	99,07	85	238,1	-
2	5,0	0,90	99,48	122	255,3	1,088
	5,0	0,89	99,48	122	255,7	1,091
3	5,0	0,90	99,48	122	255,3	1,088
	5,8	0,90	99,38	108	247,4	1,103

Pour les scénarios proposés, l'impact de WFS est prépondérant à celui de TS. Un TS proche de 0,9 m/min permet souvent d'obtenir un meilleur compromis. En examinant les données en

détail, on observe que des alternatives avec un TS plus faible ne favorise que la précision dimensionnelle aux dépens des autres critères.

Dans notre cas d'application, les critères issus du modèle de performances varient peu, du fait de plages de paramètres étudiés peu étendues. Il sera intéressant d'observer les effets avec des plages de variables de décision plus grandes, ce qui amplifieraient les variations des valeurs de performances observées.

À travers ces trois scénarios, l'aide au décideur apportée par TAMARIN est mise en avant. La visualisation des performances dans chaque critère permet au décideur de comprendre l'impact du choix d'une solution par rapport à une autre.

TAMARIN apparaît pertinent pour aider au choix d'une combinaison de paramètres de fabrication d'après le modèle de performances défini et les solutions Pareto-optimales obtenues. Le décideur peut explorer différentes alternatives, selon ses préférences, de manière interactive.

5.6. Discussion sur le modèle proposé

Le modèle d'aide à la décision proposé adresse la question de recherche : « Comment assister le choix des paramètres de fabrication d'un procédé DED en fonction des critères de performances mécaniques et industrielles durables ciblés ? » Le modèle a été appliqué au cas d'étude de la fabrication d'un mur en acier 316L représentatif d'une pièce industrielle (cf. section 1.4.5). Cependant, il a été développé afin de pouvoir être appliqué à des problèmes de décision plus larges, basés sur des modèles de performances intégrant davantage de paramètres de fabrication notamment. Afin de recueillir l'avis des potentiels utilisateurs industriels du modèle, celui-ci leur a été présenté.

5.6.1. Retours industriels

Deux utilisateurs potentiels ont testé le modèle au travers d'un entretien individuel. Le premier utilisateur, nommé utilisateur 1, est ingénieur d'études travaillant sur le procédé WAAM sur la plateforme Addimadour. Le deuxième, nommé utilisateur 2, est ingénieur de recherche au sein de l'entreprise Safran. Les deux utilisateurs ont chacun **cinq années d'expériences** avec la FAM et les procédés DED.

Le modèle d'aide à la décision dans son ensemble leur a été présenté. Puis, les utilisateurs ont été mis en situation, selon les trois scénarios présentés en section 5.5.3, avec l'interface TAMARIN. Les solutions obtenues ont été relevées et leurs avis sur différents aspects du modèle ont été recueillis à l'aide d'une échelle de Likert. Enfin, les deux utilisateurs ont pu s'exprimer sur les perspectives d'améliorations du modèle.

L'utilisation de l'interface TAMARIN par les testeurs a été une **réussite**. Ils ont pu facilement ajuster l'importance des critères et leur granularité selon les scénarios envisagés. Pour le

scénario 1, l'utilisateur 1 a obtenu comme première alternative du classement le couple (WFS = 8,3 m/min ; TS = 0,9 m/min). L'utilisateur 2 a obtenu le couple (WFS = 8,6 m/min ; TS = 0,9 m/min). **Ces deux couples sont proches des alternatives obtenues** en Table 5.4. Pour le scénario 2, les deux utilisateurs ont obtenu **les mêmes alternatives** qu'en Table 5.5. Enfin pour le scénario 3, l'utilisateur 1 a obtenu le couple (WFS = 7,5 m/min ; TS = 0,9 m/min) et l'utilisateur 2 le couple (WFS = 6,0 m/min ; TS = 0,9 m/min). Ces valeurs de WFS sont plus élevées que celles proposées en Table 5.6, mais les résultats sont proches. Les différences observées proviennent de la **hiérarchisation relative** et de la granularité, propre à chaque utilisateur, selon son **interprétation du scénario**. Par exemple, pour le scénario 3, l'utilisateur 1 a donné une plus grande importance au coût et au temps de fabrication couplée à une granularité plus élevée pour le coût. De plus, il semble que ce dernier scénario soit plus sensible du fait de l'importance élevée des quatre critères. Ainsi, l'équilibre du compromis est plus dépendant de l'utilisateur. Dans ce scénario, l'interactivité du décideur avec l'interface est primordiale car de petites modifications suffisent à influencer les résultats. La **sensibilité du modèle et le traitement des incertitudes**, lié notamment à la granularité, pourraient être investigués dans de **futurs travaux**.

Les deux testeurs s'accordent pour affirmer **l'utilité du modèle afin de choisir les paramètres de fabrication de manière interactive**. D'après eux, le modèle est adapté à une **utilisation industrielle** et son usage via l'interface TAMARIN est aisé. Il permet une **hiérarchisation intuitive** des critères pour le décideur tout en **visualisant** les alternatives correspondantes.

Les perspectives d'évolutions du modèle présenté concernent principalement l'interface et la visualisation des alternatives et de leurs performances. Une cartographie des domaines paramétriques d'intérêt selon la hiérarchisation et la granularité souhaitée a été suggérée. Par exemple, dans notre cas, un graphique plaçant les meilleures alternatives par rapport à un axe WFS et un axe TS permettrait cela. Enfin, la proximité des performances pour les différentes alternatives (due au modèle de performances développé) a été soulignée comme un élément masquant la réelle plus-value du modèle.

5.6.2. Perspectives d'évolutions du modèle

À partir des retours industriels et de la littérature scientifique, des limites et pistes d'améliorations du modèle d'aide à la décision proposé ont été identifiées.

Extensibilité

Le modèle a été testé sur un modèle de performances « réduit », avec un nombre d'alternatives admissibles faible. Ceci est le résultat du plan d'expériences élaboré dans notre contexte d'étude (cf. section 4.1.1). Il faudrait donc étudier l'extensibilité du modèle hybride proposé en l'appliquant à un modèle de performances prenant en compte plus de paramètres de fabrication (cf. section 1.4.2) et plus de critères de performance (taux de porosité, rugosité, pénibilité opérateur). Pour l'algorithme NSGA II, la convergence et la diversité des solutions pour un nombre d'alternatives admissibles élevé seront ainsi vérifiées. Pour TAMARIN, la

diversification des performances sur des plages de paramètres plus étendues permettra de souligner sa plus-value et son intérêt en obtenant des alternatives plus variées.

Le modèle pourra être appliqué à d'autres cas d'application. Le modèle ayant été implémenté de manière à être facilement adaptable, peu de développement sera nécessaire pour l'utiliser avec des modèles de performances variés. La difficulté réside dans l'élaboration du modèle de performances, couteuse en temps et en ressources matérielles. Différentes utilisations industrielles pour le WAAM ou d'autres procédés DED permettront une validation industrielle du modèle d'aide au choix des paramètres de fabrication présenté ici.

Optimisation de l'algorithme NSGA II

De futures recherches sont nécessaires pour explorer une gamme de paramétrage de l'optimisation et étudier si différents paramètres pourraient favoriser une meilleure convergence et rapidité de calcul de l'algorithme NSGA II. Par exemple, dans les travaux de Fortunet [201], la paramétrie de l'algorithme NSGA II a été déterminée pour s'assurer de la convergence de l'algorithme. Pour cela, l'appartenance des solutions au front de Pareto et leur répartition sur ce front sont mesurées via une métrique de convergence : l'hypervolume dominé. En mesurant cette métrique à chaque itération, l'efficacité de l'algorithme est déterminée. Afin de sélectionner la paramétrie favorisant la meilleure convergence pour le problème étudié, un plan d'expériences a été réalisé et a permis de définir la paramétrie idéale. Cette méthode pourrait être appliquée à notre cas d'étude. De plus, comme mentionné par Katoch *et al.* [187], la sélection automatique des paramètres du NSGA II est une perspective intéressante de développement de cet algorithme. Cette étape pourrait aussi être intégrée à notre modèle.

Validation de la phase de classement

Pour valider les solutions obtenues avec TAMARIN en fonction de la hiérarchisation des critères du décideur, il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec d'autres méthodes. Par exemple, TOPSIS pourrait être appliqué aux mêmes alternatives Pareto-optimales avec les mêmes valeurs de pondération des critères. La comparaison du classement final des alternatives par chacune des méthodes permettrait d'identifier des différences entre les deux approches et d'éventuelles limites. Les temps de calcul et d'utilisation par le décideur pourront être comparés. De plus, la sensibilité de TAMARIN par rapport à la granularité et à la hiérarchie définie pourra être évaluée.

Développement d'une interface utilisateur

Pour faciliter la prise en charge du modèle et son application industrielle, une interface utilisateur permettant de regrouper l'utilisation du NSGA II et de TAMARIN sur une même application pourrait être développée. Pour cela, les besoins utilisateur ont été définis selon différents scénarios d'utilisation, et un cahier des charges d'une telle interface a été réalisé. Ce cahier des charges a abouti au développement d'une maquette d'interface via le logiciel

Balsamik. Cette maquette pourra servir au développement d'une véritable application permettant l'utilisation du modèle proposé dans nos travaux pour l'aide au choix des paramètres de fabrication d'un procédé DED à partir d'un modèle de performances.

Les principales pistes de développement envisagées sont :

- l'affichage et la validation de la configuration du NSGA II et l'initialisation du modèle sur une interface dédiée ;
- l'ajout d'une visualisation sous forme de radar pour les alternatives classées par TAMARIN ;
- l'ajout d'une cartographie des domaines paramétriques pour la visualisation des résultats par TAMARIN ;
- le développement d'une fonctionnalité de mémorisation et de comparaison des hiérarchisations et réglages de granularité.

5.7. Conclusion

Ce chapitre présente un modèle d'aide à la décision pour le choix des paramètres de fabrication d'un procédé DED. Ce modèle hybride permet d'assister au choix des paramètres en fonction des performances ciblées, en deux temps. Une phase d'optimisation, basée sur l'algorithme NSGA II, sélectionne un sous-ensemble d'alternatives Pareto-optimales du problème. Puis une phase d'aide au choix, avec l'algorithme TAMARIN, propose un classement des alternatives selon les critères de décideur, de manière interactive. Celui-ci peut ensuite choisir l'alternative qui lui convient.

Ce modèle a été appliqué au modèle de performances défini dans nos travaux pour la fabrication d'un mur épais en acier 316L en WAAM-CMT. Les résultats obtenus sont satisfaisants en termes de performance des algorithmes. La variété des solutions obtenues selon la hiérarchisation des critères voulue par le décideur est illustrée par trois scénarios d'utilisation du modèle. Pour chaque scénario, le modèle propose un classement des alternatives Pareto-optimales. Le décideur peut ainsi choisir l'alternative qui lui convient le mieux. Pour le cas d'étude considéré dans nos travaux, il apparaît qu'un TS de 0,9 m/min semble être préférable dans la majorité des cas.

Ce modèle est interactif et permet une visualisation en direct des souhaits du décideur sur le classement des alternatives. De plus, il est simple d'utilisation et ne nécessite pas d'être piloté par un expert. Les algorithmes qui le composent sont performants et garantissent l'obtention et le classement des solutions Pareto-optimales en un temps de calcul raisonnable.

Le modèle d'aide à la décision proposé a été présenté à des industriels. Leurs retours ont permis d'identifier les limites et perspectives d'améliorations du modèle. Les deux industriels ayant utilisé le modèle ont souligné son utilité.

Ce modèle a été conçu pour s'adapter à des modèles de performances des procédés de FAM variés. Il permettra aux industriels de maîtriser les paramètres de fabrication du procédé qui influencent à la fois les performances mécaniques de la pièce produite, mais aussi les performances industrielles durables du processus de fabrication. De futurs travaux pourront porter sur le développement mathématique et informatique de l'algorithme, ainsi que son application à différents cas d'étude. Le modèle proposé pourra contribuer à l'industrialisation des procédés DED en étant appliqué à d'autres géométries, d'autres matériaux et d'autres technologies.

Conclusion Générale

Contributions scientifiques et industrielles

Les procédés DED sont encore peu utilisés de manière industrielle malgré les promesses de retombées positives économiques, environnementales et sociales suscitées par la recherche. Une des causes de cette retenue est le manque de maîtrise des performances mécaniques et industrielles durables de ces procédés. De ce constat, la question de recherche suivante a été posée :

QR : Comment choisir les paramètres de fabrication adaptés aux critères de performances mécaniques et industrielles durables pour les procédés DED ?

Pour l'adresser, ces travaux présentent le développement d'un modèle d'aide à la décision afin de guider le choix des paramètres de fabrication pour atteindre les performances ciblées pour la réalisation de pièce dans un contexte industriel donné.

Dans ce but, trois étapes ont été définies, comme illustré en Fig. 6.1 : la sélection d'un procédé DED adapté au contexte industriel visé, le développement d'un modèle de performances lié à ce procédé et le développement d'un modèle d'aide à la décision basé sur le modèle de performances. Chacune de ces étapes représente une contribution de nos travaux.

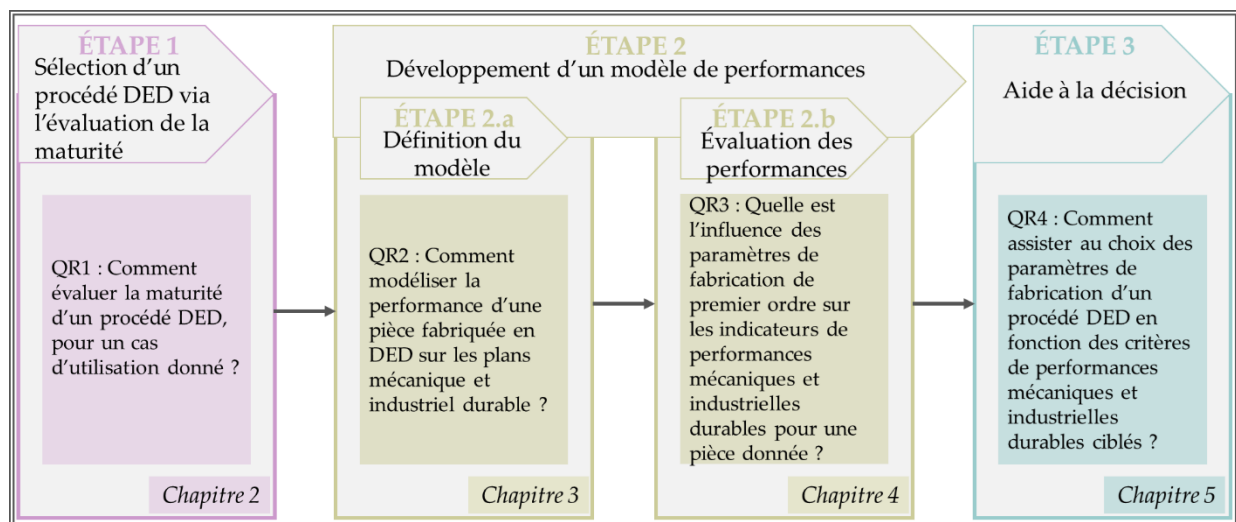


Fig. 6.1. Étapes menant au choix des paramètres de fabrication des procédés DED

Première contribution

La première étape est la sélection d'un procédé DED sur lequel baser le développement du modèle d'aide à la décision. Pour sélectionner un procédé, il est nécessaire d'évaluer sa maturité. Or, un manque a été identifié dans la littérature pour l'évaluation de la maturité des

procédés de FAM. **Notre première contribution est un modèle d'évaluation de la maturité, spécialement adapté à la FAM : le modèle AMRL.**

Ce modèle permet d'évaluer la maturité d'un couple procédé – cas d'utilisation (ou TUCC), sur une échelle semblable aux TRL et MRL, selon vingt-deux critères. Ces critères permettent d'évaluer la maturité technologique du procédé, et intègrent également les dimensions économiques, environnementales et sociales.

Ce modèle a été appliqué dans le cadre de notre contexte de recherche, afin de sélectionner un procédé DED pour développer le modèle d'aide à la décision. Le procédé WAAM-CMT couplé au cas d'utilisation de fabrication d'une nouvelle pièce en acier inoxydable a été choisi.

Limites

L'application du modèle a également permis sa validation. Cependant, certaines limites ont été identifiées :

- des biais peuvent être induits par la construction du modèle, et impacter la subjectivité de l'évaluateur ;
- le modèle ne présente pas d'étape de validation des résultats, qui pourrait être nécessaire pour consolider les résultats pour les premières utilisations de ce modèle d'évaluation de la maturité ;
- l'utilisation du modèle est longue et des erreurs de manipulation des données peuvent apparaître, et l'interprétation des résultats n'est pas favorisée par le manque d'une interface d'affichage des résultats ;
- le modèle a été développé spécifiquement pour l'évaluation de la maturité des technologies de FAM. Son adaptabilité à la FA en général doit encore être prouvée.

Deuxième contribution

La deuxième étape est le développement d'un modèle de performances du procédé sélectionné. Les études sur le WAAM, ne présentaient pas de modèles considérant à la fois les performances mécaniques et industrielles durables, en fonction des paramètres de fabrication, pour des pièces représentatives d'une pièce industrielle. **Notre deuxième contribution est donc un modèle de performances mécaniques et industrielles durables du procédé WAAM-CMT, appliqué dans le contexte industriel donné.**

Dans un premier temps, un modèle prédictif des performances a été défini. Ce modèle permet d'établir les relations entre les paramètres de fabrication (la vitesse d'avance de fil, WFS, et la vitesse de torche, TS) en entrée et les indicateurs de performance mécanique et industrielle durable (précision dimensionnelle, force maximale admissible, temps de fabrication, coût de

fabrication, éco-score) en sortie d'après la méthode de surface de réponse (par régression multiple).

Ce modèle de performances a été appliqué à la fabrication d'un mur épais en acier 316L en WAAM-CMT représentatif d'une pièce industrielle (tête de préhension). Un plan d'expériences factoriel complet a guidé la fabrication de neuf pièces pour différentes valeurs de WFS et TS. La géométrie, les propriétés mécaniques, le temps de fabrication et les ressources consommées ont été mesurés. Ces mesures ont permis de développer les connaissances relatives à la fabrication de pièces épaisses en acier 316L en WAAM-CMT.

À partir des réponses mesurées, les indicateurs de performances mécaniques et industrielles durables ont été calculés. Puis les relations analytiques entre les cinq indicateurs et les deux paramètres ont été établies. Ainsi, un modèle de performances sous forme d'un système de cinq équations permet de prédire les valeurs de la précision dimensionnelle, de la force maximale admissible, du temps de fabrication, du coût de fabrication et de l'éco-score en fonction de WFS et TS, pour les plages de valeurs testées.

Les résultats montrent que le choix d'un couple de paramètres, afin d'obtenir les performances optimales, est complexe et nécessite d'établir des compromis. En effet, les valeurs optimales des indicateurs de performances sont obtenues selon des valeurs divergentes de paramètres de fabrication.

Limites

Le modèle développé a été validé statistiquement par rapport au plan d'expériences. Cependant, dû à des contraintes de temps et de coûts, les répliques n'ont pas pu être réalisées. Ainsi, le modèle est développé sous l'hypothèse que les répliques sont identiques. Cela influe sur l'analyse de la précision du modèle obtenu. Le modèle a été développé à partir de valeurs nominales des paramètres de fabrication. Or, il a été observé que ces valeurs ne sont pas identiques aux valeurs réelles. Malgré ces causes d'incertitude, celle-ci n'a pas été analysée pour le modèle développé.

Les variations des performances mesurées sont faibles. Il est cependant nécessaire de considérer cette variation à la lumière des plages de valeurs restreintes des paramètres de fabrication.

L'application d'un tel modèle est longue et coûteuse. La définition du modèle de performances est adaptée au procédé WAAM-CMT pour le cas d'étude présenté. La transférabilité des équations obtenues à d'autres géométries, plus complexes, et d'autres matériaux n'est pas connue. De plus, si WFS et TS sont évalués comme les paramètres les plus influents dans la littérature, l'impact d'autres paramètres de fabrication comme le débit de gaz, le temps inter-couche et la température inter-couche n'a pas été modélisé.

Troisième contribution

La troisième étape est le développement d'un modèle d'aide à la décision pour le choix des paramètres de fabrication selon les critères de performances mécaniques et industrielles durables ciblés.

Le problème de décision multicritère a été formalisé. Les fonctions objectif (précision dimensionnelle, temps de fabrication, coût et éco-score) et contrainte (force maximale admissible) ont été définies. Pour adresser ce problème, **notre troisième contribution est donc un modèle d'aide à la décision permettant la résolution de problèmes de choix de paramètres de fabrication. Ce modèle hybride combine une méthode d'aide à la décision multiobjectif (NSGA II) et une méthode d'aide à la décision multiattribut (TAMARIN).**

Ce modèle permet d'obtenir les solutions satisfaisantes, par NSGA II, au regard de l'ensemble des critères, selon le modèle de performances. Puis, TAMARIN permet au décideur de choisir une alternative parmi ces solutions, selon ses souhaits (hiérarchie des critères et granularité) de manière interactive. Le modèle a été conçu pour s'appliquer à des problèmes d'aide au choix des paramètres des procédés DED pour des modèles de performances variés.

Le modèle a été appliqué à notre cas d'étude selon trois scénarios qui ont confirmé son fonctionnement. Le modèle a été validé par des industriels.

Limites

Le modèle d'aide à la décision développé a été conçu afin de pouvoir adresser des problèmes avec de nombreuses alternatives. Dans notre cas, le nombre d'alternatives considérées est faible à l'échelle des algorithmes génétiques. Le fonctionnement du modèle pour des ensembles d'alternatives plus étendus n'a pas été testé.

La configuration des paramètres de l'algorithme NSGA II a été adaptée au cas d'étude présenté et n'a pas été optimisée.

Contribution globale

Ces travaux de thèse contribuent à l'industrialisation des procédés DED en proposant un cadre méthodologique outillé, présenté en Fig. 6.2 pour aider au choix des paramètres du procédé selon les performances mécaniques et industrielles durables souhaitées.

Ces travaux ont mis en lumière l'importance d'une approche interdisciplinaire, qui a permis de maintenir une vision globale du procédé, considérant à la fois les aspects mécaniques et industriels durables. De plus, l'utilisation des outils des deux domaines, génie industriel et mécanique a permis d'aboutir à la méthodologie présentée.

Ces différentes contributions ont été mises en valeur par des publications scientifiques. L'Annexe 6.A présente ces différentes publications.

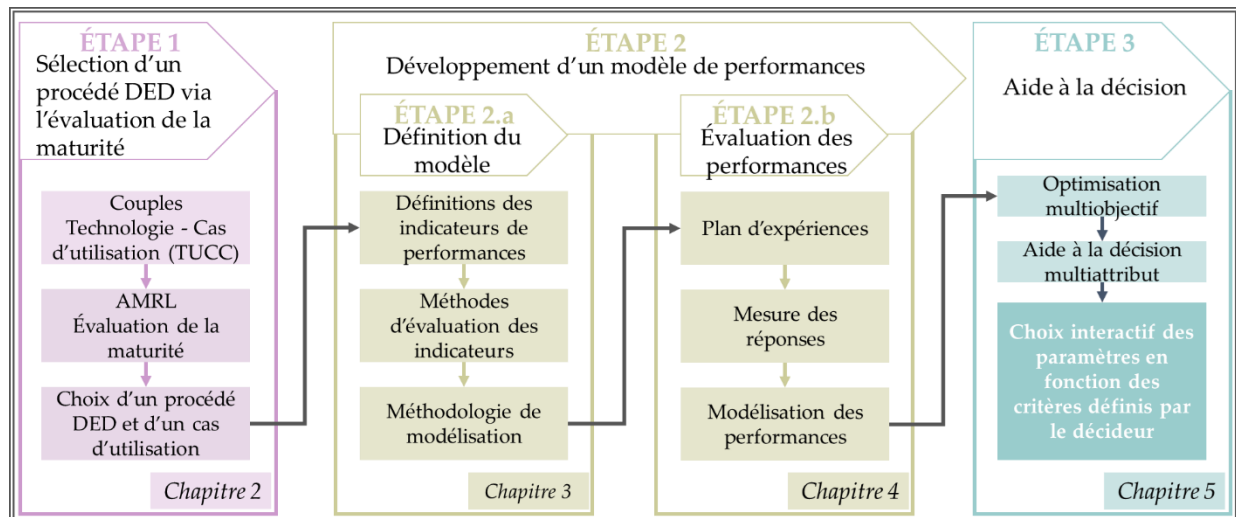


Fig. 6.2. Cadre méthodologique outillé proposé pour le développement d'un modèle d'aide au choix des paramètres de fabrication des procédés DED

Perspectives

Les travaux présentés apportent des éléments de réponse aux difficultés d'industrialisation des procédés DED. Pour contribuer encore davantage à lever les barrières à l'intégration de ces procédés par les entreprises manufacturières, les perspectives suivantes sont identifiées. Ces perspectives sont réparties selon les temps de développement et d'implémentation envisagés pour les mener à bien : court terme, moyen terme et long terme.

Court terme

Le modèle d'évaluation de la maturité devra être diffusé et appliqué plus largement. Ces applications permettront une validation du modèle proposé. Également, une étape de validation pourrait être ajoutée au modèle d'évaluation de la maturité : en faisant appliquer le modèle par plusieurs personnes sur les mêmes TUCC, un bilan collectif générera la discussion et l'élaboration d'un consensus aboutissant à une évaluation unique consolidée.

Pour le modèle de performances, une validation expérimentale par la répétition des expérimentations permettra d'évaluer les incertitudes et la variabilité des résultats obtenus. Aussi, une investigation complète des caractéristiques microstructurales des pièces fabriquées permettrait une meilleure compréhension de leurs performances mécaniques. Les méthodes de calcul des indicateurs pourront être améliorées, par exemple en intégrant l'émission des fumées de soudage à l'ACV.

Pour le modèle d'aide à la décision, l'ajout d'une étape d'optimisation de la configuration de l'algorithme génétique garantira ses performances de convergence vers les meilleures solutions. L'application du modèle à d'autres cas d'étude, basés sur des modèles de performances comprenant davantage de variables de décision permettra de le valider.

Moyen terme

Dans l'optique du développement des modèles présentés afin de faciliter leur utilisation, une automatisation de l'évaluation de la maturité à partir des réponses récoltées sur une interface en ligne favorisera son utilisation. Une telle interface sera complète si elle permet également l'affichage des résultats et la pondération interactive des critères.

Pour le modèle de performances l'étude d'indicateurs relatif à la performance sociale est nécessaire. Son application à différents cas industriels du DED permettra de le consolider et de développer la cartographie des paramètres des procédés.

Pour le modèle d'aide à la décision, son application à des pièces industrielles réelles devra être le cœur de prochains travaux de recherche. L'intégration des deux algorithmes dans une interface commune permettra une utilisation aisée des ingénieurs procédés pour choisir les paramètres des procédés DED.

Long terme

Pour la modélisation des performances, le développement d'études permettant d'investiguer différents paramètres procédés, avec différentes plages de valeurs, ainsi que différents matériaux, géométries et procédés DED permettrait de constituer un modèle prédictif complet pour le DED.

De plus, la transférabilité des résultats de ces études de modélisation est un élément clé à investiguer pour réduire le temps et le coût de telles études et contribuer plus efficacement à l'industrialisation des procédés DED. Pour cela des études sont nécessaires pour déterminer la validité des résultats selon les différents procédés, matériaux et géométries.

Enfin, les travaux de recherche pour l'intégration industrielle du DED devront également prendre en compte les autres étapes du cycle de vie des produits, en plus de l'étape de fabrication traitée dans nos travaux. L'intégration du cadre méthodologique outillé présenté dans une approche plus large pourrait être envisagé.

Bibliographie

- [1] C.G. Machado, M. Despeisse, M. Winroth, E.H.D. Ribeiro da Silva, Additive manufacturing from the sustainability perspective: Proposal for a self-assessment tool, in: *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2019: pp. 482–487. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.123>.
- [2] S. Ford, M. Despeisse, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *J. Clean. Prod.* 137 (2016) 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>.
- [3] S.H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou, Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012 675. 67 (2012) 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/S00170-012-4558-5>.
- [4] T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, G. Chen, Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact, *Addit. Manuf.* 21 (2018) 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>.
- [5] J. Elkington, *The triple bottom line: sustainability's Accountants*, in: *Environ. Manag. Readings Cases*, second edi, Sage Publications, Thousands Oaks, CA, 2008: pp. 49–66.
- [6] Commissariat général au développement durable, *Les émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'industrie manufacturière*, (2021). <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-de-l-industrie-manufacturiere>.
- [7] S. Haghghat Khajavi, I. Flores Ituarte, A. Jaribion, J. An, C. Chee Kai, J. Holmstrom, Impact of Additive Manufacturing on Supply Chain Complexity, *Proc. 53rd Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.* (2020). <https://doi.org/10.24251/hicss.2020.551>.
- [8] K. Kellens, R. Renaldi, W. Dewulf, J.P. Kruth, J.R. Duflou, Environmental impact modeling of selective laser sintering processes, *Rapid Prototyp. J.* 20 (2014) 459–470. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2013-0018>.
- [9] ISO/ASTM 52900:2021(E), *Additive manufacturing -General principles - Fundamentals and vocabulary*, *Int. Organ. Stand.* (2021). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>.
- [10] S. Milhomme, J. Lartigau, C. Brugger, C. Froustey, L. Dufau, Influence of Machine Parameters on Ti-6Al-4V Small Sized Specimens Made by Laser Metal Powder Deposition, *Adv. Mater. Res.* 1161 (2021) 113–119. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1161.113>.
- [11] D.G. Ahn, *Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art*, Korean Society for Precision Engineering, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>.

- [12] A. Gisario, M. Kazarian, F. Martina, M. Mehrpouya, Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review, *J. Manuf. Syst.* 53 (2019) 124–149. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>.
- [13] M. Cortina, J.I. Arrizubieta, A. Calleja, E. Ukar, A. Alberdi, Case Study to Illustrate the Potential of Conformal Cooling Channels for Hot Stamping Dies Manufactured Using Hybrid Process of Laser Metal Deposition (LMD) and Milling, *Met.* 2018, Vol. 8, Page 102. 8 (2018) 102. <https://doi.org/10.3390/MET8020102>.
- [14] V. Tepponen, Directed Energy Deposition of 316L Stainless Steel with Laser and Wire, Lappeenranta University of Technology, 2020. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/161919>.
- [15] F. Brueckner, M. Riede, F. Marquardt, R. Willner, A. Seidel, S. Thieme, C. Leyens, E. Beyer, Process characteristics in high-precision laser metal deposition using wire and powder, *J. Laser Appl.* 29 (2017). <https://doi.org/10.2351/1.4983237/96905>.
- [16] B. Baufeld, Wire electron beam additive manufacturing of copper, in: *J. Phys. Conf. Ser.*, Varna, 2023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2443/1/012001>.
- [17] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 81 (2015) 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.
- [18] J.L.Z. Li, M.R. Alkahari, N.A.B. Rosli, R. Hasan, M.N. Sudin, F.R. Ramli, Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing, *Int. J. Autom. Technol.* 13 (2019) 346–353. <https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346>.
- [19] T.A. Rodrigues, V. Duarte, R.M. Miranda, T.G. Santos, J.P. Oliveira, Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Materials (Basel)*. 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12071121>.
- [20] L. Gardner, P. Kyvelou, G. Herbert, C. Buchanan, Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge, *J. Constr. Steel Res.* 172 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2020.106233>.
- [21] J. Ye, P. Kyvelou, F. Gilardi, H. Lu, M. Gilbert, L. Gardner, An end-to-end framework for the additive manufacture of optimized tubular structures, *IEEE Access*. 9 (2021) 165476–165489. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3132797>.
- [22] T. Feucht, J. Lange, B. Waldschmitt, A.K. Schudlich, M. Klein, M. Oechsner, Welding process for the additive manufacturing of cantilevered components with the waam, *Adv. Struct. Mater.* 125 (2020) 67–78. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2957-3_5.
- [23] S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove, Wire + Arc Additive Manufacturing, *Mater. Sci. Technol.* 32 (2016) 641–647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.

- [24] I. Taberero, A. Paskual, P. Álvarez, A. Suárez, Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing, *Procedia CIRP*. 68 (2018) 358–362. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.12.095>.
- [25] C. Bourlet, S. Zimmer-Chevret, R. Pesci, R. Bigot, A. Robineau, F. Scandella, Microstructure and mechanical properties of high strength steel deposits obtained by Wire-Arc Additive Manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.* 285 (2020) 116759. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2020.116759>.
- [26] C. Bourlet, Développement de la fabrication additive par procédé arc-fil pour les aciers : caractérisation microstructurale et mécanique des dépôts en nuances ER100 et 316L pour la validation des propriétés d'emploi de pièces industrielles, (2020). <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02860062>.
- [27] Y. Shi, Y. Gao, Y. Luo, J. Hu, Fusions of industrialisation and digitalisation (FID) in the digital economy: Industrial system digitalisation, digital technology industrialisation, and beyond, *J. Digit. Econ.* 1 (2022) 73–88. <https://doi.org/10.1016/J.JDEC.2022.08.005>.
- [28] Q. Jarrar, F. Belkadi, A. Bernard, A Knowledge-Based Approach for Decision Support System in Additive Manufacturing, in: *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, Springer, Cham, 2021: pp. 319–327. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85914-5_34.
- [29] K. Ferdows, A. De Meyer, Lasting improvements in manufacturing performance: In search of a new theory, *J. Oper. Manag.* 9 (1990) 168–184. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(90\)90094-T](https://doi.org/10.1016/0272-6963(90)90094-T).
- [30] G.P. White, OPERATIONS A meta-analysis model of manufacturing capabilities, *Components*. 3 (1996) 42–61. <https://doi.org/10.1108/01443579610110486/FULL/PDF>.
- [31] M. Oyesola, K. Mporfu, N. Mathe, A techno-economic analytical approach of laser-based additive manufacturing processes for aerospace application, *Procedia Manuf.* 35 (2019) 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.019>.
- [32] T. Altiok, Performance Analysis of Manufacturing Systems, *Perform. Anal. Manuf. Syst.* (1997). <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1924-8>.
- [33] F. Boenzi, S. Digiesi, F. Facchini, G. Mossa, G. Mummolo, Greening activities in warehouses: A model for identifying sustainable strategies in material handling, *Ann. DAAAM Proc. Int. DAAAM Symp.* 2015-January (2015) 980–988. <https://doi.org/10.2507/26TH.DAAAM.PROCEEDINGS.138>.
- [34] A. Neely, M. Gregory, K. Platts, Performance measurement system design: A literature review and research agenda, *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 15 (1995) 80–116. <https://doi.org/10.1108/01443579510083622/FULL/PDF>.
- [35] K.G. El Mola, H. Parsaei, Dimensions and measures of manufacturing performance measurement, 40th Int. Conf. Comput. Ind. Eng. Soft Comput. Tech. Adv. Manuf. Serv. Syst. CIE40 2010. (2010). <https://doi.org/10.1109/ICCIE.2010.5668236>.

- [36] D.S. Sink, *Productivity management: planning, measurement and evaluation, control, and improvement*, John Wiley & Sons, New York, 1985.
- [37] K.K.B. Hon, *Performance and Evaluation of Manufacturing Systems*, CIRP Ann. 54 (2005) 139–154. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60023-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60023-7).
- [38] K.R. Haapala, F. Zhao, J. Camelio, J.W. Sutherland, S.J. Skerlos, D.A. Dornfeld, I.S. Jawahir, A.F. Clarens, J.L. Rickli, *A review of engineering research in sustainable manufacturing*, J. Manuf. Sci. Eng. 135 (2013). <https://doi.org/10.1115/1.4024040/694649>.
- [39] P. Manco, R. MacChiaroli, P. Maresca, M. Fera, *The Additive Manufacturing Operations Management Maturity: a Closed or an Open Issue?*, Procedia Manuf. 41 (2019) 98–105. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.07.034>.
- [40] C.G. Machado, M. Despeisse, M. Winroth, E.H.D. Ribeiro da Silva, *Additive manufacturing from the sustainability perspective: Proposal for a self-assessment tool*, Procedia CIRP. 81 (2019) 482–487. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.123>.
- [41] E.M. Sanfilippo, F. Belkadi, A. Bernard, *Ontology-based knowledge representation for additive manufacturing*, Comput. Ind. 109 (2019) 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.03.006>.
- [42] V. Cazaubon, A. Abi Akle, X. Fischer, *A Parametric Study of Additive Manufacturing Process: TA6V Laser Wire Metal Deposition*, in: 2021: pp. 15–20. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4_4.
- [43] V. Cazaubon, *Procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu : modèle, méthodes et stratégies pour la correction de défaut de pièce mécanique*, 2021. <https://theses.hal.science/tel-03551010>.
- [44] S. Milhomme, *Influence du procédé sur les propriétés mécaniques et microstructurales de pièces en Ti-6Al-4V issues de fabrication additive (LMD et SLM)*, Université de Bordeaux, 2022. <https://theses.hal.science/tel-03763499>.
- [45] S. Milhomme, J. Lartigau, C. Brugger, C. Froustey, *Bead geometry prediction using multiple linear regression analysis: Application to Ti-6Al-4V beads made by laser metal powder deposition*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 117 (2021) 607–620. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07697-w>.
- [46] A. Dass, A. Moridi, *State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design*, Coatings. 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/COATINGS9070418>.
- [47] M. Baumers, P. Dickens, C. Tuck, R. Hague, *The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push*, Technol. Forecast. Soc. Change. 102 (2016) 193–201. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2015.02.015>.
- [48] C. Achillas, D. Tzetzis, M.O. Raimondo, *Alternative production strategies based on the*

- comparison of additive and traditional manufacturing technologies, *Int. J. Prod. Res.* 55 (2017) 3497–3509. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1282645>.
- [49] M. Fera, R. Macchiaroli, F. Fruggiero, A. Lambiase, A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 95 (2018) 673–685. <https://doi.org/10.1007/S00170-017-1221-1>.
- [50] J.K. Watson, K.M.B. Taminger, A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption, *J. Clean. Prod.* 176 (2018) 1316–1322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.009>.
- [51] C.G. Mançanares, E. de S. Zancul, J. Cavalcante da Silva, P.A. Cauchick Miguel, Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 80 (2015) 1007–1014. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7092-4>.
- [52] U.K. uz Zaman, M. Rivette, A. Siadat, S.M. Mousavi, Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making, *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 51 (2018) 169–180. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2017.12.005>.
- [53] A. Haug, K.A. Wickstrøm, J. Stentoft, K. Philipsen, Knowledge networks for adoption of additive manufacturing: The role of maturity, *Proc. 55th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.* (2022). <https://doi.org/10.24251/HICSS.2022.616>.
- [54] Y. Ali, P. Henckell, J. Hildebrand, J. Reimann, J.P. Bergmann, S. Barnikol-Oettler, Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.034>.
- [55] J. Müller, M. Grabowski, C. Müller, J. Hensel, J. Unglaub, K. Thiele, H. Kloft, K. Dilger, Design and parameter identification of wire and arc additively manufactured (WAAM) steel bars for use in construction, *Metals (Basel)*. 9 (2019) 725. <https://doi.org/10.3390/met9070725>.
- [56] G.F. Vasvári, D. Csonka, T. Zsebe, Á. Schiffer, I. Samardžić, R. Told, A. Péntek, P. Maróti, CMT additive manufacturing parameters defining aluminium alloy object geometry and mechanical properties, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1545. <https://doi.org/10.3390/ma14061545>.
- [57] J. Fang, K. Wang, D. Yang, Y. Huang, Gas flow status analysis in CMT+P additive manufacturing based on texture features of molten pool images, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.179>.
- [58] A.G. Colomo, D. Wood, F. Martina, S.W. Williams, F. Martina, D. Wood, A. Garcia Colomo, A comparison framework to support the selection of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications, *Int. J. Rapid Manuf.* 9 (2020) 194. <https://doi.org/10.1504/ijrapidm.2020.107736>.
- [59] F. Chen, Y. Yang, H. Feng, Regional control and optimization of heat input during cmt

- by wire arc additive manufacturing: Modeling and microstructure effects, *Materials* (Basel). 14 (2021) 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma14051061>.
- [60] B. Xie, J. Xue, X. Ren, W. Wu, Z. Lin, A comparative study of the CMT+P process on 316L stainless steel additive manufacturing, *Appl. Sci.* 10 (2020) 3284. <https://doi.org/10.3390/app10093284>.
- [61] R. Medeiros Kindermann, M.J. Roy, R. Morana, P.B. Prangnell, Process response of Inconel 718 to wire + arc additive manufacturing with cold metal transfer, *Mater. Des.* 195 (2020) 109031. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109031>.
- [62] S. Singh, S. kumar Sharma, D.W. Rathod, A review on process planning strategies and challenges of WAAM, in: *Mater. Today Proc.*, Elsevier Ltd, 2021: pp. 6564–6575. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.632>.
- [63] Y. Koli, S. Aravindan, P. V. Rao, Influence of heat input on the evolution of δ -ferrite grain morphology of SS308L fabricated using WAAM-CMT, *Mater. Charact.* 194 (2022) 112363. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2022.112363>.
- [64] C. Li, H. Gu, W. Wang, S. Wang, L. Ren, Z. Wang, Z. Ming, Y. Zhai, Effect of Heat Input on Formability, Microstructure, and Properties of Al–7Si–0.6Mg Alloys Deposited by CMT-WAAM Process, *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10, Page 70. 10 (2019) 70. <https://doi.org/10.3390/APP10010070>.
- [65] J. V. Gordon, D. Gary Harlow, Statistical Modeling of Wire and Arc Additive Manufactured Stainless Steel 304: Microstructure and Fatigue, *Int. J. Reliab. Qual. Saf. Eng.* 26 (2019). <https://doi.org/10.1142/S0218539319500165>.
- [66] N.A. Rosli, M.R. Alkahari, M.F. bin Abdollah, S. Maidin, F.R. Ramli, S.G. Herawan, Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process, *J. Mater. Res. Technol.* 11 (2021) 2127–2145. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.02.002>.
- [67] E. Aldalur, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, A. Lamikiz, Analysis of the Wall Geometry with Different Strategies for High Deposition Wire Arc Additive Manufacturing of Mild Steel, *Metals* (Basel). 10 (2020) 892. <https://doi.org/10.3390/MET10070892>.
- [68] D.H. Ding, Z.X. Pan, C. Dominic, H.J. Li, Process planning strategy for wire and ARC additive manufacturing, *Adv. Intell. Syst. Comput.* 363 (2015) 437–450. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18997-0_37.
- [69] T.H. Vo, C. Grandvallet, F. Vignat, A model for Manufacturing Large Parts with WAAM Technology, *Adv. Manuf. Technol.* XXXIV (2021) 1–6. <https://doi.org/10.3233/ATDE210016>.
- [70] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 31 (2015) 101–110. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2014.08.008>.

- [71] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, S. Van Duin, N. Larkin, Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.004>.
- [72] X.W. Fang, C.Q. Ren, H. Bai, C.X. Wang, B.H. Lu, Analysis of characteristics of process parameters in CMT additive manufacturing, in: IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., Institute of Physics Publishing, 2019: p. 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/504/1/012018>.
- [73] B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *J. Manuf. Process.* 35 (2018) 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.
- [74] S.H. Lee, CMT-based wire arc additive manufacturing using 316l stainless steel: Effect of heat accumulation on the multi-layer deposits, *Metals (Basel)*. 10 (2020) 278. <https://doi.org/10.3390/met10020278>.
- [75] C. Fuchs, D. Baier, T. Semm, M.F. Zaeh, Determining the machining allowance for WAAM parts, *Prod. Eng.* 14 (2020) 629–637. <https://doi.org/10.1007/S11740-020-00982-9>.
- [76] B. Stucker, X. Qu, A finish machining strategy for rapid manufactured parts and tools, *Rapid Prototyp. J.* 9 (2003) 194–200. <https://doi.org/10.1108/13552540310489578>.
- [77] J. Liu, Y. Xu, Y. Ge, Z. Hou, S. Chen, Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 111 (2020) 149–198. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>.
- [78] Y. Yehorov, L.J. da Silva, A. Scotti, Balancing WAAM Production Costs and Wall Surface Quality through Parameter Selection: A Case Study of an Al-Mg5 Alloy Multilayer-Non-Oscillated Single Pass Wall, *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, Vol. 3, Page 32. 3 (2019) 32. <https://doi.org/10.3390/JMMP3020032>.
- [79] C.R. Cunningham, J. Wang, V. Dhokia, A. Shrohani, S.T. Newman, Characterisation of Austenitic 316 LSi Stainless Steel Produced by Wire Arc Additive Manufacturing with Interlayer Cooling, in: Proc. 30th Annu. Int. Solid Free. Fabr., University of Texas at Austin, 2019: pp. 426–439. <https://doi.org/10.26153/TSW/17282>.
- [80] F. Rouchon, S. Lavernhe, T. Christophe, X. Lorang, C. Tournier, Modélisation des dimensions géométriques de cordon aux points de changement de direction en WAAM, in: Conf. Manuf., Angers, 2021. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03268258> (accessed January 6, 2023).
- [81] C. Xia, Z. Pan, J. Polden, H. Li, Y. Xu, S. Chen, Modelling and prediction of surface roughness in wire arc additive manufacturing using machine learning, *J. Intell. Manuf.* 2021. (2021) 1–16. <https://doi.org/10.1007/S10845-020-01725-4>.
- [82] C.R. Cunningham, S. Wikshåland, F. Xu, N. Kemakolam, A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman, Cost Modelling and Sensitivity Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing, *Procedia Manuf.* 11 (2017) 650–657.

- <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.07.163>.
- [83] P.C. Priarone, E. Pagone, F. Martina, A.R. Catalano, L. Settineri, Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing, *CIRP Ann.* 69 (2020) 37–40. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2020.04.010>.
- [84] J. Becker, R. Knackstedt, J. Pöppelbuß, Developing Maturity Models for IT Management, *Bus. Inf. Syst. Eng.* 2009 13. 1 (2009) 213–222. <https://doi.org/10.1007/S12599-009-0044-5>.
- [85] J.A. Vivares, W. Sarache, J. E. Hurtado, A maturity assessment model for manufacturing systems, *J. Manuf. Technol. Manag.* 29 (2018) 746–767. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2017-0142>.
- [86] R.G.G. Caiado, L.F. Scavarda, L.O. Gavião, P. Ivson, D.L. de M. Nascimento, J.A. Garza-Reyes, A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management, *Int. J. Prod. Econ.* 231 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883>.
- [87] R. Lezama-Nicolás, M. Rodríguez-Salvador, R. Río-Belver, I. Bidosola, A bibliometric method for assessing technological maturity: the case of additive manufacturing, *Scientometrics.* 117 (2018) 1425–1452. <https://doi.org/10.1007/S11192-018-2941-1/TABLES/8>.
- [88] R. Lloyd Parry, Samsung blames two battery faults for Galaxy Note 7 fires, *The Times.* (2017). <https://www.thetimes.co.uk/article/samsung-blames-two-battery-faults-for-galaxy-note-7-fires-mw27lvp2z>.
- [89] H. Ernst, The Use of Patent Data for Technological Forecasting: The Diffusion of CNC-Technology in the Machine Tool Industry, *Small Bus. Econ.* 9 (1997) 361–381. <https://doi.org/10.1023/A:1007921808138>.
- [90] G. Reinhart, S. Schindler, Strategic Evaluation of Technology Chains for Producing Companies, in: *Enabling Manuf. Compet. Econ. Sustain.*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012: pp. 391–396. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4_64.
- [91] W.L. Nolte, *Did I ever tell you about the whale?*, Information Age Pub., Charlotte, NC, 2008. <https://www.infoagepub.com/index.php?id=18&p=p487b6d0463d93>.
- [92] D.E. Harter, M.S. Krishnan, S.A. Slaughter, Effects of process maturity on quality, cycle time, and effort in software product development, *Manage. Sci.* 46 (2000) 451–466. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.4.451.12056>.
- [93] L. Wang, J. Liu, Liquid Metal Inks for Flexible Electronics and 3D Printing: A Review, *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.* 2B (2015). <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-37993>.
- [94] T. V. Neumann, M.D. Dickey, Liquid Metal Direct Write and 3D Printing: A Review, *Adv. Mater. Technol.* 5 (2020) 2000070. <https://doi.org/10.1002/ADMT.202000070>.

- [95] M. Rodríguez Salvador, R. Lezama Nicolás, R.M. Río Belver, A. Rodríguez Andara, Lessons Learned in Assessment of Technology Maturity, in: Springer, Cham, 2019: pp. 103–110. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96005-0_14.
- [96] J.Y. Lee, M. Swink, T. Pandejpong, Team diversity and manufacturing process innovation performance: the moderating role of technology maturity, *Int. J. Prod. Res.* 55 (2017) 4912–4930. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1272765>.
- [97] L.A. Shah, A. Etienne, A. Siadat, F. Vernadat, Process-oriented risk assessment methodology for manufacturing process evaluation, *Int. J. Prod. Res.* 55 (2017) 4516–4529. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1268728>.
- [98] S. Ross, Application of System and Integration READINESS LEVELS to Department of Defense RESEARCH and DEVELOPMENT, *Def. Res. Dev.* 23 (2017) 25.
- [99] A. Schumacher, S. Erol, W. Sihn, A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises, *Procedia CIRP.* 52 (2016) 161–166. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.07.040>.
- [100] B. Basu, S. Ghosh, Assessment of Technology and Manufacturing Readiness Levels, in: 2017: pp. 235–246. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3017-8_11.
- [101] US Government Accountability Office, Technology readiness assessment guide: best practices for evaluating the readiness of technology for use in acquisition programs and projects preface, 2016.
- [102] OSD Manufacturing Technology Program, Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook, 2020.
- [103] P. Baiocco, G. Ramusat, A. Sirbi, T. Bouilly, F. Lavelle, T. Cardone, H. Fischer, S. Appel, System driven technology selection for future European launch systems, *Acta Astronaut.* 107 (2015) 301–316. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2014.10.037>.
- [104] A.L. Olechowski, S.D. Eppinger, N. Joglekar, K. Tomaschek, Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities, *Syst. Eng.* 23 (2020) 395–408. <https://doi.org/10.1002/sys.21533>.
- [105] C. Wu, B. Wang, C. Zhang, R.A. Wusk, Y.W. Chen, Bioprinting: an assessment based on manufacturing readiness levels, *Crit. Rev. Biotechnol.* 37 (2017) 333–354. <https://doi.org/10.3109/07388551.2016.1163321>.
- [106] W. Peters, S. Doskey, J. Moreland, Technology Maturity Assessments and Confidence Intervals, *Syst. Eng.* 20 (2017) 188–204. <https://doi.org/10.1002/SYS.21389>.
- [107] M.; Fahimian, Behdinan, Kamran, On characterisation of technology readiness level coefficients for design, in: Proc. 21st Int. Conf. Eng. Des., Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017, 2017.

- [108] S. Revfi, J. Wilwer, K. Behdinan, A. Albers, Design readiness of multi-material concepts: manufacturing and joining technology integrated evaluation of concept maturity levels using cardinal coefficients, *Proc. Des. Soc. Des. Conf.* 1 (2020) 1067–1076. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.274>.
- [109] K. Sotirios, Manufacturing readiness assessment and process planning for additive manufacturing, University of Patras, 2019. <https://nemertes.library.upatras.gr/bistreams/791ee0f0-425d-4c9f-97a8-c50bdcbbf1b8/download>.
- [110] F. Syamsuddin, Y. Priyandari, S. Sudiro, Assessment of manufacturing readiness level in PT.ABC (case study: Technology on hospital bed products), in: *AIP Conf. Proc.*, American Institute of Physics Inc., 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0000799>.
- [111] I.I. Wiratmadja, A. Mufid, The Development of Model for Measuring Railway Wheels Manufacturing Readiness Level, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Institute of Physics Publishing, 2016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012095>.
- [112] I. Bildosola, R.M. Río-Bélver, G. Garechana, E. Cilleruelo, TeknoRoadmap, an approach for depicting emerging technologies, *Technol. Forecast. Soc. Change.* 117 (2017) 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.01.015>.
- [113] B. Sauser, R. Gove, E. Forbes, J.E. Ramirez-Marquez, Integration maturity metrics: Development of an integration readiness level, *Inf. Knowl. Syst. Manag.* 9 (2010) 17–46. <https://doi.org/10.3233/IKS-2010-0133>.
- [114] A. Haug, K.A. Wickstrøm, J. Stentoft, K. Philipsen, Adoption of additive manufacturing: A survey of the role of knowledge networks and maturity in small and medium-sized Danish production firms, *Int. J. Prod. Econ.* 255 (2023) 108714. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2022.108714>.
- [115] L. Bibby, B. Dehe, Defining and assessing industry 4.0 maturity levels—case of the defence sector, *Prod. Plan. Control.* 29 (2018) 1030–1043. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1503355>.
- [116] S. Mittal, M.A. Khan, D. Romero, T. Wuest, A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs), *J. Manuf. Syst.* 49 (2018) 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>.
- [117] G.G. Schuh, R. Anderl, J.J. Gausemeier, M.M. ten Hompel, W. (Eds. . Wahlster, Lr. Ander, J.J. Gausemeier, M.M. ten Hompel, W. (Eds. . Wahlster, *Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies*, Acatech Study. (2020) 64. <https://epub.fir.de/frontdoor/index/index/docId/1112>.
- [118] C.G. Machado, M.P. Winroth, E.H.D. Ribeiro da Silva, Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda, *Int. J. Prod. Res.* 58 (2020) 1462–1484. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>.

- [119] T. Simpson, ADDITIVE INSIGHTS Getting Ready for Additive Manufacturing, *Addit. INSIGHTS*. (2020) 32–34. <https://www.additivemanufacturing.media/articles/getting-ready-for-additive-manufacturing>.
- [120] H. Bikas, S. Koutsoukos, P. Stavropoulos, A decision support method for evaluation and process selection of additive manufacturing, *Procedia CIRP*. 81 (2019) 1107–1112. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.261>.
- [121] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, S.H. Mian, Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications, *Adv. Mech. Eng.* 11 (2019). <https://doi.org/10.1177/1687814018822880>.
- [122] A. Millet, Caractérisation de la perception d'un produit hybride intégrant des composantes issues d'univers produits contradictoires en conception : application aux produits sport-santé, Université de Bordeaux, 2020. <https://theses.hal.science/tel-03150591>.
- [123] A.F. Hayes, K. Krippendorff, Answering the Call for a Standard Reliability Measure for Coding Data, *Commun. Methods Meas.* 1 (2007) 77–89. <https://doi.org/10.1080/19312450709336664>.
- [124] K. Krippendorff, *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology*, Second, SAGE, Thousand Oaks, CA, 2004. <https://journals-sagepub-com.docelec.u-bordeaux.fr/doi/10.1177/1094428108324513>.
- [125] R.S. Kaplan, Measuring manufacturing performance: a new challenge for managerial accounting research, *Readings Account. Manag. Control.* (1983) 284–306. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7138-8_14.
- [126] C. Drury, Cost control and performance measurement in an AMT environment, *Manag. Account.* 68 (1990) 40–44.
- [127] C. Adams, A. Neely, The performance prism to boost M&A success, *Meas. Bus. Excell.* 4 (2000) 19–23. <https://doi.org/10.1108/13683040010377818/FULL/PDF>.
- [128] R.D. Banker, G. Potter, R.G. Schroeder, Reporting Manufacturing Performance Measures to Workers: An Empirical Study., *J. Manag. Account. Res.* 5 (1993) 33–55.
- [129] A.B. Abdel-Maksoud, Manufacturing in the UK: Contemporary characteristics and performance indicators, *J. Manuf. Technol. Manag.* 15 (2004) 155–171. <https://doi.org/10.1108/09576060410513742/FULL/PDF>.
- [130] A. V. Roth, J.G. Miller, Success factors in manufacturing, *Bus. Horiz.* 35 (1992) 73–81. [https://doi.org/10.1016/S0007-6813\(05\)80165-X](https://doi.org/10.1016/S0007-6813(05)80165-X).
- [131] G. Chryssolouris, *Manufacturing Systems: Theory and Practice*, Springer New York, 2006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/0-387-28431-1>.

- [132] T. Nancharaiah, D. Ranga Raju, V. Ramachandra Raju, An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components, *Int. J. Emerg. Technol.* 1 (2010) 106–111. <https://www.researchgate.net/publication/267248480>.
- [133] L. Karthick, N. Mallireddy, J. Yogaraja, S. Sivakumar, A. Sasikumar, Modelling and Analysis of an EN8 crankshaft material in comparison with Forged steel crankshaft, *Mater. Today Proc.* 47 (2021) 6168–6172. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.05.079>.
- [134] Y. Wang, C. Gong, S. Zhang, H. Guo, Experimental study and numerical analysis on heavy-duty cast steel universal hinged supports for large span structures, *Int. J. Steel Struct.* 10 (2010) 99–114. <https://doi.org/10.1007/BF03249516>.
- [135] A.G. Colomo, D. Wood, F. Martina, S.W. Williams, A comparison framework to support the selection of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications, *Int. J. Rapid Manuf.* 9 (2020) 194. <https://doi.org/10.1504/ijrapidm.2020.107736>.
- [136] H. Makino, Versatility Index – An Indicator for Assembly System Selection, *CIRP Ann.* 39 (1990) 15–18. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60993-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60993-7).
- [137] X.X. Huang, L.B. Newnes, G.C. Parry, The adaptation of product cost estimation techniques to estimate the cost of service, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 25 (2012) 417–431. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2011.596281>.
- [138] P. Glavič, R. Lukman, Review of sustainability terms and their definitions, *J. Clean. Prod.* 15 (2007) 1875–1885. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2006.12.006>.
- [139] F.L. Garcia, V.A. da S. Moris, A.O. Nunes, D.A.L. Silva, Environmental performance of additive manufacturing process – an overview, *Rapid Prototyp. J.* 24 (2018) 1166–1177. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2017-0108/FULL/XML>.
- [140] ISO 14044:2006 - Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices, (n.d.). <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html>.
- [141] M. Goedkoop, R. Heijungs, A. De Schryver, J. Struijs, R. Van Zelm, ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level First edition Report I: Characterisation Mark Huijbregts 3), (2009).
- [142] M.A.J. Huijbregts, Z.J.N. Steinmann, P.M.F. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander, R. van Zelm, ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level, *Int. J. Life Cycle Assess.* 22 (2017) 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- [143] S. Kokare, J.P. Oliveira, T.G. Santos, R. Godina, Environmental and economic assessment of a steel wall fabricated by wire-based directed energy deposition, *Addit. Manuf.* 61 (2023) 103316. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103316>.

- [144] P. Kyvelou, C. Huang, L. Gardner, C. Buchanan, Structural Testing and Design of Wire Arc Additively Manufactured Square Hollow Sections, *J. Struct. Eng.* 147 (2021). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003188](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003188).
- [145] V. Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, V.A. Girelli, T. Trombetti, On the influence of the geometrical irregularities in the mechanical response of Wire-and-Arc Additively Manufactured planar elements, *J. Constr. Steel Res.* 178 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2020.106490>.
- [146] G. Posch, K. Chladil, H. Chladil, Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries, *Weld. World.* 61 (2017) 873–882. <https://doi.org/10.1007/S40194-017-0474-5/METRICS>.
- [147] S.H. Lee, Optimization of cold metal transfer-based wire arc additive manufacturing processes using gaussian process regression, *Metals (Basel)*. 10 (2020) 461. <https://doi.org/10.3390/met10040461>.
- [148] W. Jin, C. Zhang, S. Jin, Y. Tian, D. Wellmann, W. Liu, Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review, *Appl. Sci.* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10051563>.
- [149] J. Müller, J. Hensel, K. Dilger, Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures, *Weld. World.* 66 (2022) 395–407. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01204-1>.
- [150] W. Wu, J. Xue, L. Wang, Z. Zhang, Y. Hu, C. Dong, Forming Process, Microstructure, and Mechanical Properties of Thin-Walled 316L Stainless Steel Using Speed-Cold-Welding Additive Manufacturing, *Metals (Basel)*. 109 (2019). <https://doi.org/10.3390/met9010109>.
- [151] X. Chen, J. Li, X. Cheng, B. He, H. Wang, Z. Huang, Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing, *Mater. Sci. Eng. A.* 703 (2017) 567–577. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.024>.
- [152] L. Wang, J. Xue, Q. Wang, Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A.* 751 (2019) 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.078>.
- [153] F.W.C. Farias, J. da Cruz Payão Filho, V.H.P. Moraes e Oliveira, Prediction of the interpass temperature of a wire arc additive manufactured wall: FEM simulations and artificial neural network, *Addit. Manuf.* 48 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102387>.
- [154] F. Facchini, A. De Chirico, G. Mummolo, Comparative cost evaluation of material removal process and additive manufacturing in aerospace industry, *Springer Proc. Math. Stat.* 280 (2019) 47–59. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14969-7_5/FIGURES/6.
- [155] M. Dias, J.P.M. Pragaña, B. Ferreira, I. Ribeiro, C.M.A. Silva, Economic and

- Environmental Potential of Wire-Arc Additive Manufacturing, *Sustain.* 2022, Vol. 14, Page 5197. 14 (2022) 5197. <https://doi.org/10.3390/SU14095197>.
- [156] I.H. Shah, N. Hadjipantelis, L. Walter, R.J. Myers, L. Gardner, Environmental life cycle assessment of wire arc additively manufactured steel structural components, *J. Clean. Prod.* 389 (2023) 136071. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136071>.
- [157] P.E. Eltes, L. Kiss, M. Bartos, Z.M. Gyorgy, T. Csakany, F. Bereczki, V. Lesko, M. Puhl, P.P. Varga, A. Lazary, Geometrical accuracy evaluation of an affordable 3D printing technology for spine physical models, *J. Clin. Neurosci.* 72 (2020) 438–446. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2019.12.027>.
- [158] N. Decker, Y. Wang, Q. Huang, Efficiently registering scan point clouds of 3D printed parts for shape accuracy assessment and modeling, *J. Manuf. Syst.* 56 (2020) 587–597. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.001>.
- [159] F. Pusavec, D. Kramar, P. Krajnik, J. Kopac, Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies, *J. Clean. Prod.* 18 (2010) 1211–1221. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2010.01.015>.
- [160] A.C.M. Bekker, J.C. Verlinden, Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel, *J. Clean. Prod.* 177 (2018) 438–447. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.148>.
- [161] K.A. Marill, R.J. Lewis, Advanced Statistics: Linear Regression, Part II: Multiple Linear Regression, *Acad. Emerg. Med.* 11 (2004) 94–102. <https://doi.org/10.1197/J.AEM.2003.09.006>.
- [162] C.M. Anderson-Cook, C.M. Borror, D.C. Montgomery, Response surface design evaluation and comparison, *J. Stat. Plan. Inference.* 139 (2009) 629–641. <https://doi.org/10.1016/J.JSPI.2008.04.004>.
- [163] M.N. Thombre, H.A. Preisig, M.B. Addis, Developing Surrogate Models via Computer Based Experiments, in: *Comput. Aided Chem. Eng.*, Elsevier, 2015: pp. 641–646. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63578-5.50102-X>.
- [164] A. Arjunan, M. Singh, A. Baroutaji, C. Wang, Additively manufactured AlSi10Mg inherently stable thin and thick-walled lattice with negative Poisson’s ratio, *Compos. Struct.* 247 (2020) 112469. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112469>.
- [165] ISO 14343:2017, Welding consumables – Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels – Classification, (2017). <https://doi.org/https://www.iso.org/standard/67727.html>.
- [166] L. Palmeira Belotti, J.A.W. van Dommelen, M.G.D. Geers, C. Goulas, W. Ya, J.P.M. Hoefnagels, Microstructural characterisation of thick-walled wire arc additively manufactured stainless steel, *J. Mater. Process. Technol.* 299 (2022) 117373. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2021.117373>.

- [167] X. Cao, S. Duan, J. Liang, W. Wen, D. Fang, Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section, *Int. J. Mech. Sci.* 145 (2018) 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.006>.
- [168] Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, W. Wang, Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process, (2010). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.11.002>.
- [169] S. Hervé, Traitements thermiques des aciers inoxydables, *Tech. l'ingénieur Trait. Des Métaux.* 2 (2016) m1155. <https://doi.org/https://doi.org/10.51257/a-v3-m1155>.
- [170] X. Chen, J. Li, X. Cheng, H. Wang, Z. Huang, Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing, *Mater. Sci. Eng. A.* 715 (2018) 307–314. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2017.10.002>.
- [171] ISO 6892-1:2019(E), Metallic materials - Tensile testing, Int. Organ. Stand. 3rd editio (2019).
- [172] M. Srivastava, S. Rathee, A. Tiwari, M. Dongre, Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour, *Mater. Chem. Phys.* 294 (2022) 126988. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126988>.
- [173] L. Sun, F. Jiang, R. Huang, D. Yuan, C. Guo, J. Wang, Anisotropic mechanical properties and deformation behavior of low-carbon high-strength steel component fabricated by wire and arc additive manufacturing, *Mater. Sci. Eng. A.* 787 (2020) 139514. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139514>.
- [174] L. Terrenoir, J. Lartigau, A. Arjunan, L. Laguna Salvado, C. Merlo, Influence of wire feed speed and torch speed on the mechanical properties of wire arc additively manufactured stainless steel, *J. Manuf. Sci. Eng.* 145 (2023) 1–44. <https://doi.org/10.1115/1.4063108>.
- [175] ASM International, *Metals Handbook*. 9th Ed. Vol. 3. Properties and Selection Stainless Steels, Tool Materials & Special-purpose Metal, 9th ed., 1980.
- [176] A. Yadollahi, N. Shamsaei, S.M. Thompson, D.W. Seely, Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A.* 644 (2015) 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.056>.
- [177] D. Arnott, G. Pervan, A critical analysis of decision support systems research, *Formul. Res. Methods Inf. Syst.* (2015) 67–87. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jit.2000035>.
- [178] S.H. Zanakis, A. Solomon, N. Wishart, S. Dublish, Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods, *Eur. J. Oper. Res.* 107 (1998) 507–529. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00147-1).

- [179] L. Laguna-Salvadó, M. Luras, U. Okongwu, T. Comes, A multicriteria Master Planning DSS for a sustainable humanitarian supply chain, *Ann. Oper. Res.* 283 (2019) 1303–1343. <https://doi.org/10.1007/S10479-018-2882-3>.
- [180] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Paris, France, 1985.
- [181] S.J. Shin, D.B. Kim, G. Shao, A. Brodsky, D. Lechevalier, Developing a decision support system for improving sustainability performance of manufacturing processes, *J. Intell. Manuf.* 28 (2017) 1421–1440. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1059-z>.
- [182] C.-L. Hwang, K. Yoon, *Methods for Multiple Attribute Decision Making*, (1981) 58–191. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3.
- [183] K.P. Yoon, C.-L. Hwang, *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*, Sage Unive, SAGE Publications Inc., Thousand Oaks, CA, 1995.
- [184] A. Kandakoglu, A. Frini, S. Ben Amor, Multicriteria decision making for sustainable development: A systematic review, *J. Multi-Criteria Decis. Anal.* 26 (2019) 202–251. <https://doi.org/10.1002/MCDA.1682>.
- [185] S. Bandaru, K. Deb, Multi-Objective Optimization, *Decis. Sci.* (2016) 161–200. <https://doi.org/10.1201/9781315183176-12>.
- [186] C. Colapinto, R. Jayaraman, S. Marsiglio, Multi-criteria decision analysis with goal programming in engineering, management and social sciences: a state-of-the art review, *Ann. Oper. Res.* 251 (2017) 7–40. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1829-1>.
- [187] S. Katoch, S.S. Chauhan, V. Kumar, A review on genetic algorithm: past, present, and future, *Multimedia Tools and Applications*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>.
- [188] Q. Liu, X. Li, H. Liu, Z. Guo, Multi-objective metaheuristics for discrete optimization problems: A review of the state-of-the-art, *Appl. Soft Comput. J.* 93 (2020) 106382. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106382>.
- [189] I.H. Osman, G. Laporte, Metaheuristics: A bibliography, *Ann. Oper. Res.* 1996 635. 63 (1996) 511–623. <https://doi.org/10.1007/BF02125421>.
- [190] S. Nasmachnow, An overview of metaheuristics: accurate and efficient methods for optimisation, *Int. J. Metaheuristics.* 3 (2014) 320. <https://doi.org/10.1504/IJMHEUR.2014.068914>.
- [191] A. Gogna, A. Tayal, Metaheuristics: Review and application, *J. Exp. Theor. Artif. Intell.* 25 (2013) 503–526. <https://doi.org/10.1080/0952813X.2013.782347>.
- [192] T. Bartz-Beielstein, J. Branke, J. Mehnen, O. Mersmann, *Evolutionary Algorithms*, Wiley Interdiscip. Rev. Data Min. Knowl. Discov. 4 (2014) 178–195. <https://doi.org/10.1002/WIDM.1124>.

- [193] Z. Michalewicz, M. Schoenauer, Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems, *Evol. Comput.* 4 (1996) 1–32. <https://doi.org/10.1162/EVCO.1996.4.1.1>.
- [194] B. Li, J. Li, K. Tang, X. Yao, Many-Objective Evolutionary Algorithms, *ACM Comput. Surv.* 48 (2015). <https://doi.org/10.1145/2792984>.
- [195] V. Gardeux, Conception d’heuristiques d’optimisation pour les problèmes de grande dimension. Application à l’analyse de données de puces à ADN., 2011.
- [196] E. Zitzler, L. Thiele, Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach, *IEEE Trans. Evol. Comput.* 3 (1999) 257–271. <https://doi.org/10.1109/4235.797969>.
- [197] M. Emmerich, N. Beume, B. Naujoks, An EMO algorithm using the hypervolume measure as selection criterion, *Lect. Notes Comput. Sci.* 3410 (2005) 62–76. https://doi.org/10.1007/978-3-540-31880-4_5/COVER.
- [198] N. Beume, G. Rudolph, Faster S-Metric Calculation by Considering Dominated Hypervolume as Klee’s Measure Problem, (n.d.). <http://ls11-www.cs.uni-dortmund.de/> (accessed August 22, 2023).
- [199] Q. Zhang, H. Li, MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition, *IEEE Trans. Evol. Comput.* 11 (2007) 712–731. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.892759>.
- [200] M.T.M. Emmerich, A.H. Deutz, A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods, *Nat. Comput.* 17 (2018) 585–609. <https://doi.org/10.1007/S11047-018-9685-Y/TABLES/1>.
- [201] C. Fortunet, Une méthode d’optimisation multicritère pour le Design For Manufacturing : application aux portes d’avion, Université Clermont-Auvergne, 2017. <https://theses.hal.science/tel-03934526>.
- [202] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evol. Comput.* 6 (2002) 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- [203] A. Slowik, H. Kwasnicka, Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems, *Neural Comput. Appl.* 32 (2020) 12363–12379. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04832-8>.
- [204] A.J. Nebro, J. Galeano-Brajones, F. Luna, C.A.C. Coello, Is NSGA-II Ready for Large-Scale Multi-Objective Optimization?, *Math. Comput. Appl.* 2022, Vol. 27, Page 103. 27 (2022) 103. <https://doi.org/10.3390/MCA27060103>.
- [205] A. Jamwal, R. Agrawal, M. Sharma, V. Kumar, Review on multi-criteria decision analysis in sustainable manufacturing decision making, *Int. J. Sustain. Eng.* 14 (2021)

- 202–225. <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1866708>.
- [206] T.L. Saaty, How to make a decision: The analytic hierarchy process, *Eur. J. Oper. Res.* 48 (1990) 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I).
- [207] J. Ge, W. Zhang, M. Luo, G. Catalanotti, B.G. Falzon, C. Higgins, D. Zhang, Y. Jin, D. Sun, Multi-objective optimization of thermoplastic CF/PEKK drilling through a hybrid method: An approach towards sustainable manufacturing, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 167 (2023) 107418. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107418>.
- [208] L. Laguna Salvadó, E. Villeneuve, D. Masson, A. Abi Akle, N. Bur, Decision Support System for technology selection based on multi-criteria ranking: Application to NZEB refurbishment, *Build. Environ.* 212 (2022) 108786. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.108786>.
- [209] S. Kumar, R. Singh, T.P. Singh, A. Batish, On twin screw extrusion parametric optimisation using hybrid approach of ANOVA and TOPSIS for 3D printing applications, *Adv. Mater. Process. Technol.* 9 (2023) 152–168. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2087844>.
- [210] P.J. Pawar, D.P.R. Kalal, Multi-objective optimisation of grinding process parameters using NSGA-II, *Int. J. Metaheuristics.* 2 (2013) 123. <https://doi.org/10.1504/IJMHEUR.2013.054137>.
- [211] E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, P. Lafon, Multi-Objective Optimization of Additive Manufacturing Process, *IFAC-PapersOnLine.* 51 (2018) 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.250>.
- [212] M. Kamaal, M. Anas, H. Rastogi, N. Bhardwaj, A. Rahaman, Effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D-printed carbon fibre–PLA composite, *Prog. Addit. Manuf.* 6 (2021) 63–69. <https://doi.org/10.1007/S40964-020-00145-3/METRICS>.
- [213] M. Sugavaneswaran, B. Prashanthi, A. John Rajan, A multi-criteria decision making method for vapor smoothening fused deposition modelling part, *Rapid Prototyp. J.* 28 (2022) 236–252. <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2020-0184/FULL/XML>.
- [214] S.M. R, V. S, Parametric optimization of fused deposition modelling process using Grey based Taguchi and TOPSIS methods for an automotive component, *Rapid Prototyp. J.* 27 (2021) 155–175. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2019-0269/FULL/XML>.
- [215] C.-L. Hwang, K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making, 186 (1981). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
- [216] L. Patrício, R.P. Fisk, J.F. e Cunha, L. Constantine, Multilevel service design: From customer value constellation to service experience blueprinting, *J. Serv. Res.* 14 (2011) 180–200. <https://doi.org/10.1177/1094670511401901>.
- [217] M.K. Heris, NSGA II in Matlab, (2015). <https://yarpiz.com/56/ypea120-nsga2>.

-
- [218] K. Krippendorff, Computing Krippendorff's Alpha-Reliability, Dep. Pap. (2011).
https://repository.upenn.edu/asc_papers/43.

Annexes

Sommaire

Annexe du Chapitre 1	175
Annexe 1.A	175
Annexes du Chapitre 2	177
Annexe 2.A	177
Annexe 2.B	180
Annexe 2.C	183
Annexes du Chapitre 4	185
Annexe 4.A	185
Annexe 4.B	186
Annexe 4.C	187
Annexe 4.D	195
Annexe 4.E	196
Annexe 4.F	197
Annexe 4.G	200
Annexes du Chapitre 5	208
Annexe 5.A	208
Annexe 5.B	215
Annexe 5.C	216
Annexe de la Conclusion	217
Annexe 6.A	217

Annexe du Chapitre 1

Annexe 1.A

Guide pour diriger les entretiens avec les ingénieurs procédés CMT

Introduction

Ce document contient les éléments clés qui seront discutés lors des entretiens avec les experts du procédé CMT. Notre objectif est de discuter de manière ouverte et de récolter autant de données que possible. Ce document nous aidera à homogénéiser le contenu des entretiens afin de collecter les mêmes informations à un niveau de détail similaire, et à recenser les réponses de manière systématique.

Ce document sert aussi à formaliser la méthodologie/protocole de ces entretiens afin qu'elle puisse être reprise dans le cadre d'autres recherches.

Objectifs de recherche

Les objectifs de recherche associés à cet entretien sont les suivants :

- Définition du process de fabrication
- Identification des paramètres et variables intervenant à chaque étape du process
- Validation du modèle de connaissance

Entretien : Introduction

Le projet de recherche SEQUOIA cherche à contribuer à l'industrialisation de la fabrication additive métallique et notamment des procédés DED. Nous travaillons en particulier sur le procédé WAAM-CMT. Notre objectif est i) de cartographier l'ensemble des paramètres et variables (de manière non exhaustive) intervenant dans le procédé de fabrication et les liaisons entre ces paramètres et ii) à partir de ces données construire un modèle d'aide à la décision à destination des industriels pour contribuer à l'industrialisation de ce procédé.

Cet entretien intervient afin de remplir l'objectif i). Grâce à l'expertise des acteurs industriels travaillant avec le procédé CMT, nous voulons nous assurer de la pertinence du modèle de connaissance développé à partir de la littérature scientifique. Pour cela, nous interrogeons des experts selon le questionnaire suivant. Puis dans un deuxième temps nous confronterons les réponses au modèle de connaissance créé par ailleurs.

Trame de l'entretien

Accord pour l'enregistrement ?

- Global
 - o Quel est le business model de la plateforme (R&D, Conception, Presta) ?
 - Quels types d'activités sont menées sur votre plateforme ? (Recherche, indus, prototypage, série) ?
 - A quelles fins est utilisé le process CMT ?
 - o Description du process CMT (différentes étapes, éléments à considérer, entrées, sorties)
 - o Description du matériel utilisé (Robot, poste de soudage, moyens de contrôles, interfaces, connectique entre les divers éléments)
 - o Matériau le mieux maîtrisé via ce process ?
 - o Types de pièces/géométries déjà imprimées ?
- Process
 - o Cahier des charges
 - Quelles données en entrée ?
 - Besoin de définir des paramètres en fonction des entrées ?
 - o Pré-process
 - Quelles sont les étapes de pré-process (choix du substrat, préparation du substrat et du fil) ?
 - Sur quels éléments peut-on influencer ?
 - o Fabrication
 - Quels paramètres sont réglés ?
 - Dans quel ordre ?
 - Modifications pendant la fabrication ?
 - Qu'est ce qui est mesuré en direct ? à quoi doit-on faire attention ?
 - o Post process
 - Est-il sous-traité ?
 - Comment sont définies les étapes de post process ?
 - Lesquelles sont réalisées sur place ?
 - Comment est définie la gamme d'usinage ?
 - o Contrôle qualité
 - Comment est contrôlée la qualité de pièces produites ?
 - Contrôles en cours de fabrication ?
 - Après ?
 - Quelles informations sont recherchées ? Qu'est ce qui est contrôlé ?
- Y a-t-il des contrôles autres que sur la pièce ?
 - o Santé/Sécurité :
 - o Quels sont les dangers identifiés au niveau du process de fabrication ?
 - o Quels sont les moyens/process de protection mis en œuvre ?
 - o Quelles sont les opérations de maintenance courantes ?
 - o Quels défauts de la machine peuvent apparaître ?

Annexes du Chapitre 2

Annexe 2.A

Sous-critères du modèle AMRL

A. Technologie industrielle

- A.1 détermine le niveau du développement de la technologie de FA associée au TUCC. La technologie a-t-elle fait ses preuves en tant que prototype dans un environnement de laboratoire, ou dans un environnement opérationnel ? A-t-elle été qualifiée ?
- A.2 évalue la disponibilité des différents éléments permettant la réalisation du TUCC à échelle industrielle. La technologie de FA et son application pour un matériau ou une géométrie particulière sont-elles répandues et maîtrisées dans l'industrie ? La production est-elle réalisable sur la base de ces observations ?
- A.3 permet d'examiner comment le TUCC évalué s'intègre au processus de fabrication dans le cadre du cas d'utilisation défini. Contrairement à A.1 qui se concentre sur la technologie de FA en elle-même, on évalue ici l'ensemble du processus de fabrication considéré au regard du TUCC défini.

B. Conception

- B.1 permet d'évaluer le niveau de maturité dans l'étape d'industrialisation du TUCC étudié. Les performances industrielles sont-elles identifiées ? Leur évaluation a-t-elle été planifiée ? Comment les maîtriser ?
- B.2 est relatif aux géométries (ou à la géométrie précisée par le TUCC le cas échéant) réalisables dans le cadre du TUCC défini. Selon la technologie et le matériau, certaines géométries sont maîtrisées ou non.

C. Matériaux

- C.1 permet d'évaluer le niveau de maîtrise de mise en œuvre du matériau d'apport dans le périmètre où est menée l'évaluation. Pour la FAM notamment, il peut exister de grandes disparités de développement selon le matériau pour une même technologie (comme par exemple l'usage de poudre d'aluminium qui est très complexe comparé aux poudres d'acier).
- C.2 évalue la maturité de la chaîne d'approvisionnement du matériau d'apport. L'identification des risques au niveau de l'approvisionnement et la mise en place de solutions pour assurer la production est nécessaire à la mise en œuvre industrielle du TUCC.

D. Procédé de fabrication

- D.1 reflète le niveau de maturité atteint dans la modélisation et la simulation des phénomènes physiques impliqués dans le procédé de fabrication. Selon le TUCC, les modèles permettent de prévoir le comportement du procédé et son résultat au niveau qualitatif et quantitatif.
- D.2, en lien avec D.1, évalue la maturité d'utilisation des modèles développés et la maîtrise des données relatives au TUCC mis en œuvre au travers du procédé de fabrication. Les performances sont-elles identifiées, maîtrisées, objectivées ?
- D.3 correspond à la maîtrise de la qualité de la production au travers du contrôle (mesures, tests non-destructifs) des pièces produites, in situ et en sortie du procédé, par rapport aux spécifications attendues. Est-on capable d'évaluer et de corriger les performances ou la qualité attendues ? Dans quelle mesure ?

E. Équipements

- E.1 est un sous-critère qui revêt une importance particulière pour la FAM. En effet les spécificités des matériaux d'apport comme les poudres métalliques requièrent un traitement particulier pas toujours maîtrisé par les organisations. Dans l'optique du développement d'un TUCC à échelle industrielle, il est indispensable de s'assurer que les équipements nécessaires pour assurer à la fois un environnement de travail protégé mais aussi la qualité du produit sont identifiés et maîtrisés pour une mise en œuvre en production.
- E.2 permet de prendre en compte la maturité et la disponibilité de l'ensemble des technologies secondaires (autres que la technologie de FA en elle-même) nécessaires dans le contexte du TUCC pour assurer la production. Les outillages, équipement pour le pré et post process sont-ils identifiés, développés, maîtrisés ? Une stratégie de maintenance de ces équipements est-elle envisagée, élaborée ?

F. Coûts

- F.1 examine la maîtrise des estimations de coût du TUCC selon son développement. Les indicateurs de coûts sont-ils identifiés ? La modélisation des coûts prend-elle en compte uniquement le procédé de fabrication ou l'ensemble de la chaîne de valeur ? Le modèle a-t-il été validé au fur et à mesure du développement industriel du TUCC (prototype, ligne pilote, plein régime) ?
- F.2 correspond à l'analyse de coûts basés sur la modélisation et le réel. Les outils d'analyses appropriés sont-ils maîtrisés ? Les leviers sont-ils identifiés ? Des objectifs de coûts sont-ils définis ? Sont-ils atteignables ?
- F.3 évalue la maturité de la stratégie économique de l'organisation pour le développement du TUCC depuis la définition d'une stratégie d'investissement en

recherche et développement jusqu'au suivi budgétaire précis de la ligne de production à plein régime.

G. Aspect environnemental

- G.1 comprend la maîtrise des estimations d'impact environnemental sur l'ensemble de la chaîne de valeur dans le cadre du TUCC considéré. Les indicateurs sont-ils identifiés ? Le modèle a-t-il été validé au fur et à mesure du développement industriel du TUCC (prototype, ligne pilote, plein régime) ?
- G.2 se rapporte à l'analyse de l'impact environnemental basé sur la modélisation et le réel mesuré et observé. Les outils d'analyses appropriés sont-ils maîtrisés ? Les leviers sont-ils identifiés ? Des objectifs sont-ils définis ? Sont-ils atteignables ?
- G.3 évalue la maturité de la stratégie environnementale de l'organisation pour le développement du TUCC. Les objectifs environnementaux sont-ils identifiés, quantifiés, suivis ? Influent-ils sur les choix de conception du prototype, de la ligne pilote ?

H. Aspect social

- H.1 se rapporte aux compétences nécessaires pour développer le TUCC et le mettre en œuvre pour la production à plein régime. Les besoins en termes de compétences ont-ils été identifiés pour les différentes étapes du développement ? Si besoin, la montée en compétences a-t-elle été planifiée ? La disponibilité des ressources humaines a-t-elle été identifiée, évaluée, satisfaite ?
- H.2 évalue la maturité du TUCC en termes de pénibilité pour l'opérateur. Les risques et contraintes ont-ils été identifiés, évalués ? Des solutions ont-elles été étudiées, mises en place, testées aux différents niveaux de développement du TUCC ?
- H.3 considère la modélisation de l'impact sociétal sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Les indicateurs sont-ils identifiés ? Le modèle a-t-il été validé au fur et à mesure du développement industriel du TUCC (prototype, ligne pilote, plein régime) ?
- H.4, le management, fait ici référence aux moyens et aux techniques de gestion de production dans le cadre du TUCC défini. Une stratégie de planification de la production a-t-elle été étudiée, définie, testée, validée ? Des outils de gestion de production sont-ils en place de manière efficace ?

Annexe 2.B

Évaluations des sous-critères pour la validation

Cette annexe présente les évaluations de la seconde itération de validation du modèle. Les colonnes de A à F correspondent aux six experts évaluateurs. La colonne G correspond à notre évaluation. Chaque ligne correspond à un sous-critère d'un des six TUCC sélectionnés.

	A	B	C	D	E	F	G
WAAM Nouvelle pièce Acier	A.1.	6		6			6
	A.2.	4		6			6
	A.3.	5		5			5
	B.1.	4		5			4
	B.2.	3		7			4
	C.1.	5		5			5
	C.2.	1		3			4
	D.1.	4		6			5
	D.2.	4		4			4
	D.3.	4		4			4
	E.1.	3		6			6
	E.2.	3		4			5
	F.1.	4		3			3
	F.2.	5		3			5
	F.3.	3		3			3
	G.1.	2		4			2
	G.2.	2		2			2
	G.3.	1		3			1
	H.1.	4		5			4
	H.2.	5		5			5
H.3.	1		1			1	
H.4.	1		3			3	

WAAM Ajout fonction Titane	A.1.	4	4				4
	A.2.	5	2				5
	A.3.	5	3				5
	B.1.	4	2				2
	B.2.	5	2				2
	C.1.	5	4				5
	C.2.	4	1				4
	D.1.	6	5				5
	D.2.	4	3				3
	D.3.	4	4				4
	E.1.	5	3				5
	E.2.	4	3				3
	F.1.	3	3				3
	F.2.	3	3				3
	F.3.	3	2				2
	G.1.	2	2				2
	G.2.	2	2				2
	G.3.	2	1				1
	H.1.	4	4				4
	H.2.	1	5				1
H.3.	1	1				1	
H.4.	1	1				1	

LMD-W Nouvelle pièce Titane	A.1.		4		5	5
	A.2.		5		6	6
	A.3.		5		6	6
	B.1.		4		4	4
	B.2.		4		5	5
	C.1.		4		5	5
	C.2.		4		4	4
	D.1.		5		5	5
	D.2.		4		4	5
	D.3.		3		4	4
	E.1.		4		5	5
	E.2.		4		6	5
	F.1.		3		3	3
	F.2.		2		3	3
	F.3.		2		5	2
	G.1.		1		1	1
	G.2.		1		2	1
	G.3.		1		1	1
	H.1.		4		5	4
	H.2.		2		1	1
H.3.		1		1	1	
H.4.		1		3	3	

LMD-W Réparation Titane	A.1.			4	4	4
	A.2.			2	4	4
	A.3.			5	4	4
	B.1.			3	5	3
	B.2.			4	4	4
	C.1.			5	6	5
	C.2.			4	4	4
	D.1.			5	5	5
	D.2.			3	4	4
	D.3.			4	5	4
	E.1.			4	7	4
	E.2.			4	6	4
	F.1.			3	4	3
	F.2.			5	3	3
	F.3.			4	3	2
	G.1.			2	1	2
	G.2.			2	2	2
	G.3.			2	1	1
	H.1.			4	4	4
	H.2.			5	1	2
H.3.			1	1	1	
H.4.			3	3	3	

LMD-P Réparation Titane	A.1.			4		5	5
	A.2.			4		5	5
	A.3.			4		5	5
	B.1.			2		5	4
	B.2.			4		5	4
	C.1.			5		7	5
	C.2.			4		4	3
	D.1.			5		2	2
	D.2.			2		3	3
	D.3.			5		6	5
	E.1.			6		6	4
	E.2.			3		4	4
	F.1.			3		4	3
	F.2.			2		2	2
	F.3.			4		1	2
	G.1.			1		1	1
	G.2.			3		1	1
	G.3.			1		1	1
	H.1.			4		4	4
	H.2.			3		6	5
H.3.			1		3	1	
H.4.			3		3	3	

LMD-P Nouvelle pièce Acier	A.1.			5		6	6
	A.2.			6		6	6
	A.3.			5		5	5
	B.1.			5		5	5
	B.2.			5		5	5
	C.1.			6		6	6
	C.2.			8		3	3
	D.1.			7		3	3
	D.2.			4		4	4
	D.3.			5		4	5
	E.1.			8		5	5
	E.2.			6		5	5
	F.1.			5		3	3
	F.2.			6		3	3
	F.3.			5		2	2
	G.1.			2		1	2
	G.2.			2		1	2
	G.3.			1		1	1
	H.1.			5		4	4
	H.2.			5		5	5
H.3.			1		1	1	
H.4.			4		3	3	

Annexe 2.C

Calcul de l'alpha de Krippendorff

Le calcul de l'alpha de Krippendorff est défini par $\alpha_k = 1 - \frac{D_0}{D_e}$ avec D_0 qui représente le désaccord observé parmi les valeurs assignées aux unités observées et D_e qui représente le désaccord attendu si les données étaient codées de manière aléatoire.

Pour le calculer, la méthode suivante est utilisée [218].

Pour notre problème, il s'agit de la méthode D – *ordinal metric differences*.

Tout d'abord, une matrice de fiabilité des données est construite pour N unités observées par m observateurs :

$$\begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mN} \end{bmatrix}$$

Le nombre d'observateurs m de la donnée u observateur noté m_u . Avec les données manquantes, cette matrice contient moins de m_N observateurs et m_u est variable. Dans notre cas, le nombre de données manquantes est constant. Il y a trois observateurs par unité : $m_u = 3$.

Dans notre cas, il y a 22 critères multipliés par 6 TUCC soit 132 unités. La taille de la matrice est de 132 x 7 observateurs soit 924 valeurs. Avec 3 observateurs par unité, on a 396 valeurs définies et 528 données manquantes.

La matrice de coïncidence est ensuite construite de la manière suivante :

	1	...	k	...	m+1	
1	o_{11}	...	o_{1k}	...	o_{1m+1}	n_1
:	:		:		:	
c	o_{c1}	...	o_{ck}	...	o_{cm+1}	n_c
:	:		:		:	
132	o_{m+11}	...	o_{m+1k}	...	o_{m+1m+1}	n_{m+1}
	n_1		n_k		n_{m+1}	n

Avec : $o_{ck} = \sum_u \frac{\text{Nombre de paires } c-k \text{ dans } u}{m_u - 1}$ et $n_c = \sum_k o_{ck}$. On a $n = \sum_c \sum_k o_{ck}$

Chaque unité contient $m_u(m_u - 1)$ coïncidences. La matrice de coïncidence comptabilise toutes les paires trouvées pour chaque unité.

Dans notre cas, on utilise ensuite la méthode de calcul ordinal. La fonction différence δ_{ck}^2 est introduite pour prendre en compte l'écart entre les évaluations (selon si une unité est évaluée 5 par l'observateur 1 et 6 par l'observateur 2 ou 4 par l'observateur 1 et 7 par l'observateur 2, la mesure du désaccord ne sera pas la même). Alors on a :

$$D_0 = \frac{1}{n} \sum_c \sum_k o_{ck} \delta_{ck}^2$$

$$D_e = \frac{1}{n(n-1)} \sum_c \sum_k n_c \cdot n_k \delta_{ck}^2$$

Avec :

$$\delta_{ck}^2 = \left(\sum_{g=c}^{g=k} n_g - \frac{n_c + n_k}{2} \right)^2$$

Pour conclure, on a : $\alpha_k = 1 - (n-1) \frac{\sum_c \sum_k o_{ck} \delta_{ck}^2}{\sum_c \sum_k n_c \cdot n_k \delta_{ck}^2}$

Ces calculs sont codés dans la macro utilisée et on obtient le résultat suivant via le logiciel IBM SPSS Statistics :

```

Krippendorff's Alpha Reliability Estimate

      Alpha  Units  Obsvrs  Pairs
Ordinal ,6634 132,0000  7,0000 396,0000

Judges used in these computations:
A  B  C  D  E  F  G
=====

Observed Coincidence Matrix
42,00  7,50  4,50  3,50  1,50  ,00  ,00  ,00
 7,50 23,00  4,00  4,00  5,50  ,00  ,00  ,00
 4,50  4,00 32,00 11,00  7,00  3,00  1,50  1,00
 3,50  4,00 11,00 61,00 19,00  3,00  1,50  ,00
 1,50  5,50  7,00 19,00 46,00  8,00  1,00  1,00
 ,00  ,00  3,00  3,00  8,00 17,00  ,00  ,00
 ,00  ,00  1,50  1,50  1,00  ,00  ,00  ,00
 ,00  ,00  1,00  ,00  1,00  ,00  ,00  ,00

Expected Coincidence Matrix
 8,66  6,57  9,56 15,38 13,29  4,63  ,60  ,30
 6,57  4,79  7,13 11,47  9,91  3,45  ,45  ,22
 9,56  7,13 10,21 16,69 14,42  5,02  ,65  ,32
15,38 11,47 16,69 26,60 23,21  8,08  1,04  ,52
13,29  9,91 14,42 23,21 19,83  6,98  ,90  ,45
 4,63  3,45  5,02  8,08  6,98  2,35  ,31  ,16
 ,60  ,45  ,65  1,04  ,90  ,31  ,03  ,02
 ,30  ,22  ,32  ,52  ,45  ,16  ,02  ,01

```

Annexes du Chapitre 4

Annexe 4.A

Cycles de polissage réalisés

Table 4.A.1 Détails des cinq cycles de polissages pour échantillons en acier 316L avec polisseuse à cycles automatique Laboforce 100

Support	Pré-polissage			Polissage	
	MD-Piano 80	MD-Piano 220	MD-Largo	MD-Mol	MD-Chem
Suspension			DiaPro Largo	DiaProMol	OP-S
Granulométrie (μm)		68	9	3	1
Lubrifiant	Eau	Eau	-	-	-
Vitesse (tr/min)	300	300	150	150	150
Force par éch. (N)	25	25	40	20	15
Temps (min)	Jusqu'à planéité	Jusqu'à planéité	4	3	1

Annexe 4.B

Mesures géométriques des cordons

Pour les pièces (b) et (c) 35% de recouvrement provoquait clairement une surépaisseur visible à l'œil nu. Deux cordons ont donc été économisés et 40% n'a pas été testé.

Table 4.B.1. Mesures des cordons pour la détermination du taux de recouvrement

Ref pièce	WFS (m/min)	TS (m/min)	Taux recouvrement	Δh (mm)	Aire critique (mm ²)
(a)	5	0,6	20%	0,00	4,05
			25%	0,25	1,48
			30%	0,17	1,15
			35%	0,32	0,41
			40%	0,65	0,45
(b)	7,5	0,6	20%	0,27	3,85
			25%	0,56	2,81
			30%	0,74	1,55
			35%	0,52	1,71
			-	-	-
(c)	10	0,6	20%	0,09	3,79
			25%	0,47	4,04
			30%	0,56	1,70
			35%	0,36	4,85
			-	-	-
(d)	5	0,75	20%	0,01	1,80
			25%	0,16	0,70
			30%	0,23	1,20
			35%	0,36	0,46
			40%	0,67	0,50
€	7,5	0,75	20%	0,20	3,15
			25%	0,24	2,44
			30%	0,39	1,91
			35%	0,30	1,81
			40%	0,51	1,09
(f)	10	0,75	20%	0,19	4,62
			25%	0,24	4,69
			30%	0,20	4,12
			35%	0,29	2,51
			40%	0,26	2,29
(g)	5	0,9	20%	0,73	0,28
			25%	0,13	2,67
			30%	0,34	0,27
			35%	0,33	0,15
			40%	0,47	0,10
(h)	7,5	0,9	20%	0,08	1,55
			25%	0,13	1,01
			30%	0,18	0,79
			35%	0,18	0,58
			40%	0,29	0,45
(i)	10	0,9	20%	0,10	1,50
			25%	0,17	0,89
			30%	0,27	0,60
			35%	0,40	0,46
			40%	0,43	0,30

Annexe 4.C

Protocole de Fabrication - Bloc X - Lot X

Date : XX/XX/XXXX


Nom et prénom de l'utilisateur Machine : XXXXXXXXXX

Diffusion : Laurent Terrenoir, Julie Lartigau, Anaïs Domergue, Pierre Michaud.

Le protocole ci-dessous a été écrit afin d'homogénéiser et d'assurer un suivi du processus de fabrication des murs pour le prélèvement d'éprouvettes d'essais mécaniques pour la thèse de Laurent TERRENOIR. Chaque étape doit être respectée.

Toutes les cases avec ces caractères XXX doivent être remplies au cours du cycle de fabrication.

TOUTE ÉTAPE AJOUTÉE OU CHANGEMENT JUGÉ NÉCESSAIRE ET URGENT DOIT ÊTRE RENSEIGNÉ DANS LA RUBRIQUE COMMENTAIRES À LA FIN DU DOCUMENT. CES COMMENTAIRES DEVRONT ÊTRE COPIÉS SUR LE DOCUMENT « RAPPORT DE FABRICATION ».

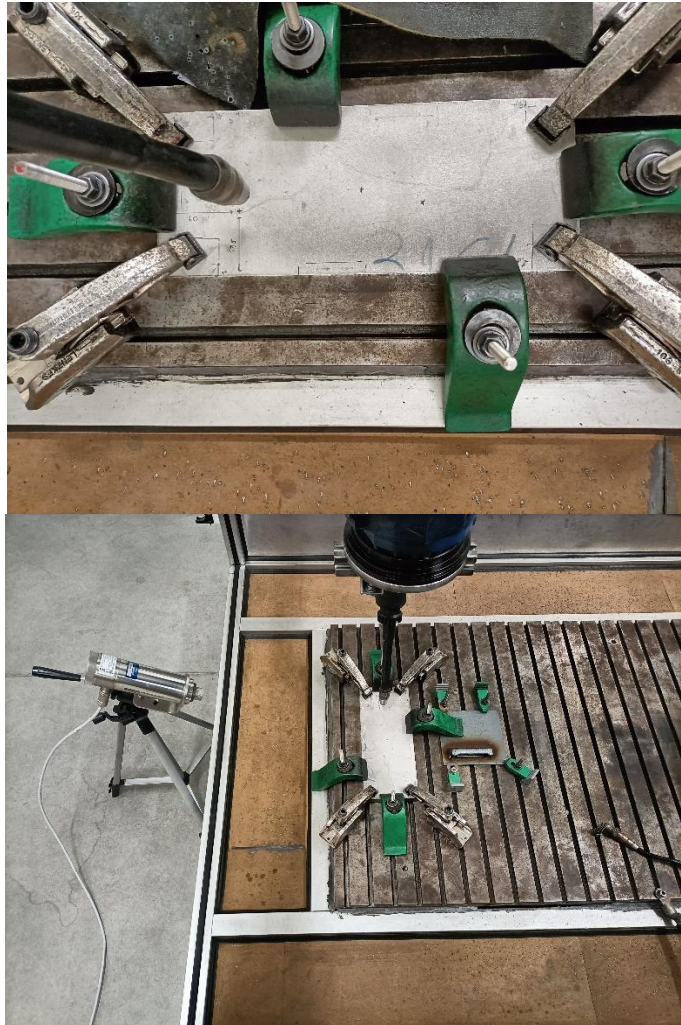
Informations	
Fil utilisé (Nuance, \varnothing) :	Selectarc MIG 316L Si, 1.2mm
Machine utilisée :	Fronius Trans Plus Synergic 3200 Remote & Robot Kuka Kr 100-2HA 2000 (Addimadour)
Préparation et initialisation	
1. Enregistrez-sous le document remplaçant les « X » par les données correspondantes (date sous le format AAAAMMJJ, n° de lot, n° de murs)	
2. Remplacer les « X » dans le titre et le premier encadré du document par les données correspondantes (n° bloc, n° lot, dates, nom et prénom utilisateur)	
3. Vérifier que l'arrêt d'urgence est enfoncé, allumer les machines et initialiser le robot	
4. Configurer le KCP : dans <i>Configurer</i> , sélectionner <i>5-Groupe Utilisateur</i> . En bas choisir <i>Expert</i> . Mot de passe : KUKA puis <i>Ok</i> et <i>Accepter</i> .	
5. Passer en mode manuel (tourner la clé sur T en bas à droite)	
6. Reconfigurer les E/S : Dans <i>Visualiser</i> : 0- E/S puis à droite 1- <i>Sortie digit</i> puis <i>Entrée</i>	
Activer la Sortie 12 : se positionner sur le point de la sortie 12 puis tenir la gâchette homme mort derrière le KCP et appuyer sur <i>Entrée</i> en même temps. Le voyant doit s'allumer en rouge. Puis <i>Fermer</i> (en bas).	
Ne pas oublier de déverrouiller l'arrêt d'urgence.	
Attention, si la sortie 12 n'est pas en rouge, il faut Reconfigurer les E/S. Pour cela, aller dans <i>Configurer</i> , 1 Driver E/S puis 2/ Reconfigurer les E/S	

A. Pesée et installation du fil	
A1. Vérifier que la bobine de fil installée dans le compartiment correspond à la nuance et au diamètre renseignés dans la première ligne du tableau.	
A2. Rembobiner le fil (si nécessaire) et retirer la bobine du dévidoir : débloquer les galets entraîneurs côté dévidoir puis côté torche et rembobiner le fil manuellement en faisant tourner la bobine. Penser à bien attacher le fil à la bobine. Desserrer le bouchon central (où est le frein) puis déverrouiller le capteur de fil en le positionnant vers le bas (allumé en orange).	
A3. Noter le numéro de bobine utilisée, et indiquer si elle est neuve (N) ou utilisée (U)	Bobine X (N/U)
A5. Allumer la balance et tarer la balance.	
A6. Peser le fil et relever sa masse ci-contre.	m: XXXX g
A7. Remettre la bobine dans le dévidoir.	
A8. Vérification tube contact et embouts et changement tube contact et embouts le cas échéant. Vérifier aussi que les galets entraîneurs sont adaptés (galettes du haut lisses). Vérifier que la gaine installée est bien la gaine métallique sinon la changer.	Spécifier ici ce qui a été changé :
A9. Si du fil a dû être coupé, le peser et noter ici sa masse puis le conserver dans la boîte prévue à cette effet	m : XXXX g
B. Montage	
<i>Pour le montage et le démontage des pièces, se munir de gants anti-coupures.</i>	
B1. Vérifier que tous les éléments de montage et outils nécessaires sont disponibles. La liste est donnée ci-contre. Cocher le matériel pendant la vérification. Passer les brides au spray anti-grattons.	<p>Pièces :</p> <input type="checkbox"/> 1 substrats 316L 300x120x18 mm
	<p>Matériel de bridage ? :</p> <input type="checkbox"/> 4 brides en S (en acier revêtement vert) <input type="checkbox"/> 8 écrous en T M8 <input type="checkbox"/> 4 goujons M8 <input type="checkbox"/> 4 écrous à embase M8 <input type="checkbox"/> 4 brides acier Lenzke 106 K12 <input type="checkbox"/> 4 vis CHC M12 <input type="checkbox"/> 4 vis CHC M8
	<p>Outils :</p> <input type="checkbox"/> Règle graduée <input type="checkbox"/> Marqueur <input type="checkbox"/> Clé allen de 6 <input type="checkbox"/> Clé allen de 8 <input type="checkbox"/> Clé plate de 13
	<p>Instrumentation :</p> <input type="checkbox"/> Pyromètre

	<input type="checkbox"/> Capteur à effet Hall <input type="checkbox"/> Wattmètre <input type="checkbox"/> O2 <input type="checkbox"/> Décibel-mètre <input type="checkbox"/> Thermomètre & hygromètre <input type="checkbox"/> Aspiration <input type="checkbox"/> Pied à coulisse
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Photographies de montage

Le montage à réaliser doit correspondre aux photographies ci-dessous.





B2. Poncer (P60), nettoyer, puis peser le substrat en notant le numéro correspondant en dessous


Substrat : X
 Masse : XXXX g

B2. Utiliser le marqueur et le mètre pour tracer des repères à 22,5 cm depuis le côté du plateau de soudage côté robot, et à 7 cm du côté du plateau proche de la trappe d'ouverture

B3. Visser les écrous en T sur les goujons correspondants (sur la partie vis la plus courte). Insérer un montage écrous-goujons pour brides vertes par rainure du plateau de soudage identifiée (un sur la première rainure, deux sur la troisième et un sur la cinquième) et deux montages écrous-goujons-bride par rainure du plateau de soudage identifiée (deux fois sur la première et la cinquième rainures du plateau) pour les deux grands côtés du substrat (se reporter aux photographies du montage).

<p>B5. Tracer sur le dessus des substrats les repères suivants : un marquage à 60 mm du petit côté, et 47,5 mm du grand côté, pour indiquer le point de départ de la fabrication, une flèche pour indiquer le sens de fabrication de la couche 1 (cf. photographie ci-contre) et le point correspondant au milieu du substrat (150mm/60mm). Puis, placer le substrat sur les repères tracés sur le plateau.</p>	
<p>B6. Positionner les brides vertes et commencer à visser les écrous à embase sur le haut des goujons.</p>	
<p>B7. Positionner les brides Lenzke sur le substrat. Points d'attention : Les brides doivent être alignés avec les côtés du substrat, à moins de 5 mm du bord afin de ne pas gêner la fabrication. Les goujons doivent être le plus éloignés possible des substrats pour éviter de gêner la buse lors des fabrications.</p>	
<p>B8. Une fois toutes les pièces correctement positionnées, serrer les écrous et les vis CHC.</p>	
<p>B9. Prendre une photographie du montage. Photographie à insérer ici</p>	
<p>C. Réglage RCU et robot</p>	
<p>C1. Paramétrage du RCU : Dans <i>Menu</i> puis <i>Optimiser et gérer les tâches</i> : <i>Editer tâche en ligne ?</i> Répondre OUI Dans <i>Menu</i>, <i>Préréglages de la machine</i> puis F3 puis choisir paramètres <i>interne</i> dans l'onglet <i>G – Interface robot</i> à l'aide de la molette</p>	
<p>C2. Paramétrer la loi synergique Dans <i>Menu</i>, dans <i>Optimiser et gérer les tâches</i>, chercher le matériau 316L puis dans <i>Matériaux</i> (en bas à gauche) chercher la base de la loi synergique CMT 1627 (base 0979) – numéro de tâche 47 Puis vérifier la vitesse de fil et la noter ci-contre.</p>	<p>Vitesse d'avance de fil : WFS = X m/min</p>
<p>C3. Dans le KCP, charger le programme adapté au bloc : Copier puis coller le programme KRL de la clé USB vers le dossier <i>R1</i> puis <i>Program</i> puis <i>SEQUOIA</i>. Vérifier le programme : <i>blocX.src</i> et ENTREE et vérifier les éléments suivants dans le programme. Puis <i>Navigateur</i>, <i>Abandon</i>.</p>	<p>Bases utilisées : base 3 et base 4 (outil 2) Vitesse robot (TS) : Velcp = XXXX (unité ?) Décalage de base Z : decz = X unité ?</p>
<p>C4. Faire sortir le fil du tube contact et couper à distance du <i>stick out</i> à l'aide du pied à coulisse</p>	<p>Stick out = 15mm</p>
<p>C5. Définir la position du point de départ dans le programme. Pour cela, cliquer sur « Mouvement » puis dans PTP. Aller une fois vers la gauche et sur la fenêtre qui s'ouvre sélectionner l'outil 2 et la base créée. Revenir sur la fenêtre principale puis aller vers la droite pour définir la vitesse et l'accélération du robot de sa position actuelle vers ce point qui va être défini. V=1%, Acc=1%. Puis <i>Navigateur</i> puis <i>Abandon</i> pour enregistrer. Revenir sur le programme, aller sur la ligne du PTP créé, bouger le robot jusqu'à la position de départ choisie puis cliquer sur « Mod Pos ».</p>	

<p>Puis <i>Navigateur</i> puis <i>Abandon</i> pour enregistrer.</p> <p>Se mettre au début du programme <i>Int X</i>.</p>	
<p>C6. Lancer un <i>dry run</i> en mode manuel :</p> <p>Clé sur T, déverrouiller l'arrêt d'urgence, puis <i>Acquitter</i>. Enlever l'arc en bas à gauche. Rester appuyer sur la gâchette homme-mort.</p> <p>I devient vert.</p> <p>Rester appuyer sur le bouton avec la flèche qui tourne.</p> <p>Le logiciel peut éventuellement demander <i>Override</i>, répondre <i>NON</i>.</p> <p>Quand la coïncidence avec le PTP est atteinte, appuyer à nouveau sur le bouton avec la flèche qui tourne et tenir à la fois ce bouton et la gâchette homme-mort appuyés pour réaliser le <i>dry run</i> complet.</p> <p>Verrouiller le bouton d'arrêt d'urgence (appuyé) en fin de <i>dry-run</i>.</p>	<p>(Lancement du programme sans distribution de fil ni arc électrique) à vitesse très réduite (notamment près des brides) afin de vérifier qu'il n'y ait aucun risque de collision de la buse avec le montage.</p> <p>Risque identifié : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non</p> 
<p>C7. Lancer un <i>dry run</i> en mode automatique :</p> <p>Basculer la clé en haut à gauche puis appuyer sur I.</p> <p>Ouvrir le programme et appuyer sur le bouton vert avec flèche vers le haut jusqu'à atteindre le KCP.</p> <p>Puis appuyer à nouveau. Le programme se lance.</p>	<p>Risque identifié : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non</p>
<p>C8. Si un risque de collision est identifié lors du <i>dry run</i>, ajuster le montage, reprendre les origines des pièces déplacées puis relancer le <i>dry run</i>.</p>	
<p>D. Gaz</p>	
<p>D1. Vérifier que le gaz utilisé est bien le Mison 2 sinon connecter la bouteille de gaz correspondante.</p>	
<p>D2. Ouvrir la vanne d'accès.</p>	<p>Noter la contenance de la bouteille = XXXX bar</p>
<p>E. Vérification des moyens de contrôles</p>	
<p>E1. Ouvrir le fichier Excel de suivi des fabrications et renseigner les champs demandés.</p>	
<p>E2. Vérifier que le Wattmètre est en place et le programmer pour l'enregistrement en le connectant à l'ordinateur puis à l'aide du logiciel PEL.</p>	

<p>E3. Placer le pyromètre sur les marques prévues à cet effet devant le plateau de soudage de manière qu'il soit centré sur le centre du substrat. Connectez-le et lancer le logiciel. Tester la fonction enregistrement.</p>	 <p>Chemin d'enregistrement des données : à renseigner</p>
<p>E4. Ouvrir l'application Décibelmètre et poser le téléphone sur l'établi au milieu de la cellule. Relever Db0.</p>	<p>Db0= X Db</p>
<p>E5. Vérifier que le thermomètre et l'hygromètre de la cellule sont fonctionnels et noter T0 et H0.</p>	<p>T0= X °C H0= X %</p>
<p>E6. Placer le mesureur de la qualité de l'air au niveau de la marque prévue à cet effet et noter O2init.</p>	<p>O2init= X%</p>
<p>E7. Vérifier la connexion du capteur à effet Hall et préparer l'enregistrement des données.</p>	
<p>E8. Positionner la hotte et l'allumer, fermer la cellule.</p>	
<h2 style="background-color: #0070C0; color: white; padding: 5px;">Fabrication</h2>	
<h3 style="color: #0070C0;">F. Fabrication additive</h3>	
<p>F1. Lancer l'acquisition des données et les différents appareils de mesure.</p>	
<p>F2. S'équiper avec les Équipements de Protection Individu</p>	
<p>F3. Réactiver l'arc.</p>	
<p>F4. Noter l'heure de lancement.</p>	<p>Hi : XXh XXmin</p>
<p>F5. Lancer le programme <i>blocX.src</i>.</p>	
<p>F6. Pendant le dépôt lancer l'acquisition Db.</p>	
<p>F7. Après le dépôt de chaque couche, appuyer sur <i>STOP</i> puis relever dans l'ordre les mesures suivantes (Tcellule, hygrométrie, O2 concentration, Db moy pendant la fabrication et pendant l'inter-couche). Reporter ces données dans le fichier Excel de suivi.</p>	
<p>F8. Mesurer la hauteur de la couche déposée (s'équiper des gants anti-chaleur)</p>	
<p>F9. Ajuster la hauteur dans le logiciel du robot (decz) sur le KCP. Noter decz pour chaque couche dans le fichier Excel de suivi.</p>	
<p>F10. Prendre des photos au début, au milieu et à la fin de la fabrication du bloc.</p>	
<p>F11. Vérifier que la buse n'est pas encombrée par des résidus de matériau. La nettoyer si nécessaire avec une pince et les gants anti-chaleur. Noter les couches où un nettoyage a été nécessaire.</p>	<p>Nettoyage buse pour couches : X, X, X, X</p>

F12. Lorsque toutes ces actions ont été effectuées, lorsque la température maximale relevée par le pyromètre est inférieure à 400°C, surélever le pyromètre de X cm pour la couche suivante et réenclencher le programme. Reprendre à l'étape F6 .	
F13. Une fois le programme terminé (lorsque la hauteur de la pièce dépasse 160 mm), noter l'heure de fin de fabrication, puis éloigner la torche en Z (mouvement en Z+) puis attendre le refroidissement de la pièce (environ X heures).	
F14. Fermer le gaz, les différents appareils de mesure, le poste Fronius et le robot.	
F15. Pendant la phase de refroidissement, retirer et peser la bobine.	m = XXXX g
F16. Enregistrer ce protocole, la feuille de mesure et les différentes données relevées dans le dossier correspondant au bloc fabriqué.	
G. Démontage des pièces	
G1. Une fois la pièce refroidie, démonter pas à pas les brides avec précaution (en cas de déformation du substrat).	
G2. Aspirer la zone de fabrication pour enlever les différents résidus.	
G3. Utiliser la brosse métallique pneumatique pour nettoyer le bloc fabriqué et le dessus du substrat.	
G4. Noter SOUS le substrat : la date, le numéro de lot et le numéro du bloc. Réserver la pièce.	XXXXXXXX
G5. Ranger les pièces de bridage dans les sachets adéquats après les avoir nettoyés à l'alcool isopropylique.	
G6. Nettoyer à nouveau la chambre de fabrication à l'aide de l'aspirateur. Passer un essuie-tout avec de l'alcool isopropylique sur le plateau.	
H. Mesures et référencement des pièces	
H1. Peser à l'aide d'une balance le bloc fabriqué.	Relevés Masse : Bloc X : XXXX g
H2. Mesurer et noter à l'aide d'un pied à coulisse, la longueur en trois points de mesures (à ¼ ; ½ et ¾ de la hauteur), puis en trois points de mesures (à ¼ ; ½ et ¾ de la longueur) les trois dimensions du mur.	Longueur pièce : Lpièce, mesure 1 : XXXX mm Lpièce, mesure 2 : XXXX mm Lpièce, mesure 3 : XXXX mm Hauteur pièce : Hpièce, mesure 1 : XXXX mm Hpièce, mesure 2 : XXXX mm Hpièce, mesure 3 : XXXX mm Épaisseur pièce : Epièce, mesure 1 : XXXX mm Epièce, mesure 2 : XXXX mm Epièce, mesure 3 : XXXX mm
H3. Prendre chaque pièce en photographie de face et de profil, avec le réglet devant comme échelle.	

<p>Si au cours de la fabrication un changement de bobine est nécessaire, chronométrer le temps d'arrêt, penser à peser la bobine neuve et la bobine vide.</p>	<p>Bobine X (N/U) m: XXXX g</p> <p>Bobine X (N/U) m: XXXX g</p>
<p>COMMENTAIRES :</p> <p><i>Signaler ici tout changement ou ajout d'étape jugé nécessaire pendant la fabrication (problème machine, etc.). Mentionner « RAS » uniquement si le protocole a été strictement respecté et si aucune anomalie quelle qu'elle soit n'a été détectée pendant la préparation ou la fabrication des pièces.</i></p>	

<p><input type="checkbox"/> « Je certifie que toutes les étapes de ce protocole ont été respectées, et que les données remplies dans ce document sont exactes »</p>		
<p>Date</p>	<p>Nom et Prénom</p>	<p>Signature</p>

Annexe 4.D

Plan des murs fabriqué et localisation des éprouvettes prélevées

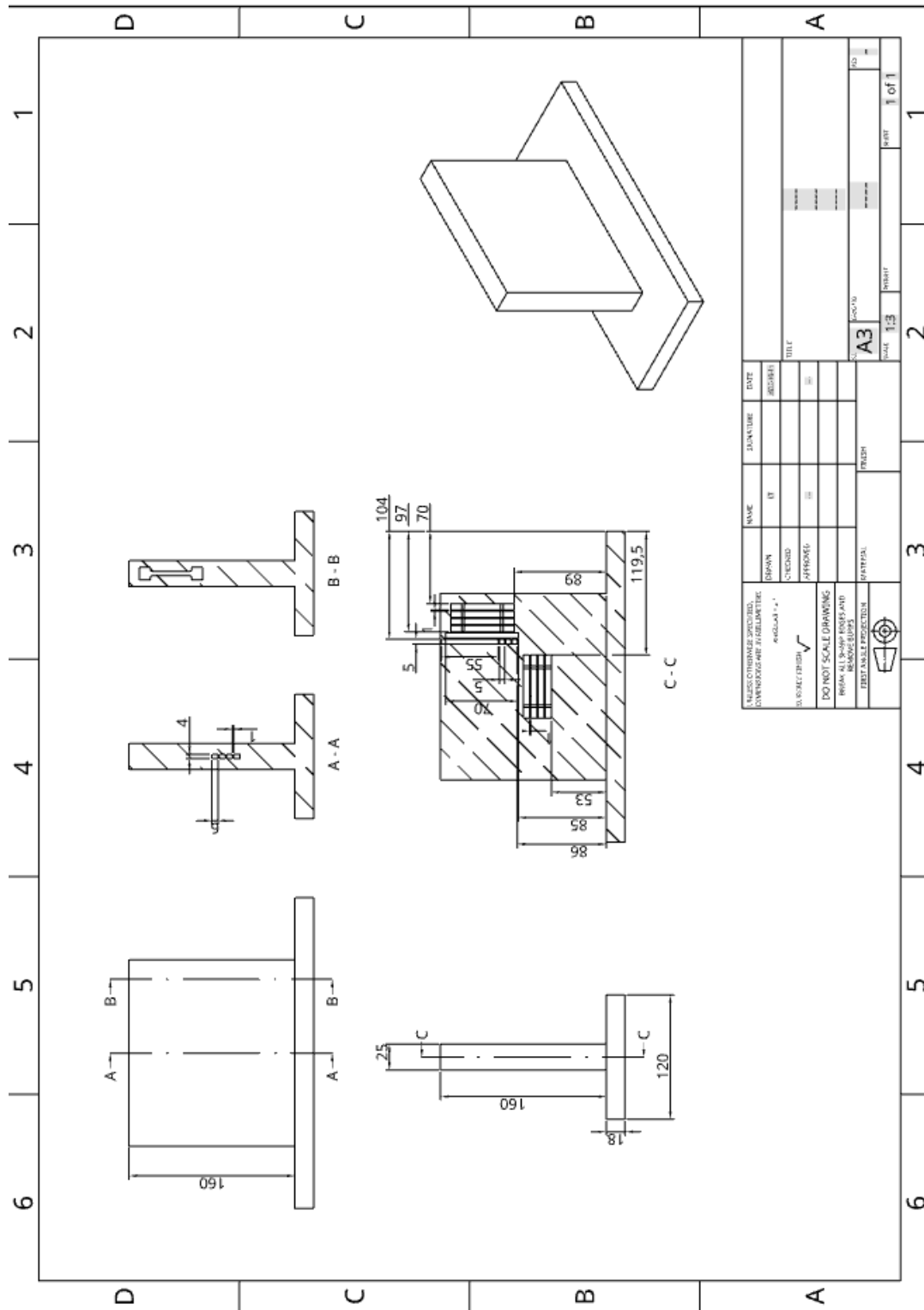


Fig. 4.D.1. Plan des murs fabriqués et localisation des éprouvettes

Annexe 4.E

Note de calcul de la force maximale admissible avec Ansys

Le calcul de la force maximale admissible est réalisé avec le logiciel Ansys Workbench dans le module de calcul statique linéaire. Les étapes suivantes sont réalisées :

- La géométrie CAO de la pièce est importée.
- Les propriétés du matériau sont définies selon les résultats des essais de traction (cf. Table 4.F.3).
- Les conditions aux limites (appuis et chargement) sont appliquées selon le cahier des charges (données industrielles).
- Le maillage est généré. L'ensemble de la pièce est maillé avec des éléments à dominante tétraédrique d'une taille de 2,5 mm (bodysizing – 3mm). La densité de maillage est validée avec l'outil de convergence. La contrainte équivalente atteint une asymptote pour un nombre d'éléments supérieur à 190 000 et un nombre de nœuds supérieur à 270 000. Le maillage est illustré sur la Fig. 4.E.1.
- Le calcul est ensuite effectué. En fonction de la force F appliquée à la pièce, la contrainte équivalente est calculée et comparée à la contrainte maximale admissible, σ_{adm} (équation 3.1). Le coefficient de sécurité s est fixé égal à 8.
- Pour déterminer la force maximale admissible, une méthode dichotomique est adoptée, dans laquelle la force F appliquée à la pièce est incrémentée. La force maximale admissible F_{max} est déterminée pour $\sigma_{VM} \approx \sigma_{adm}$.

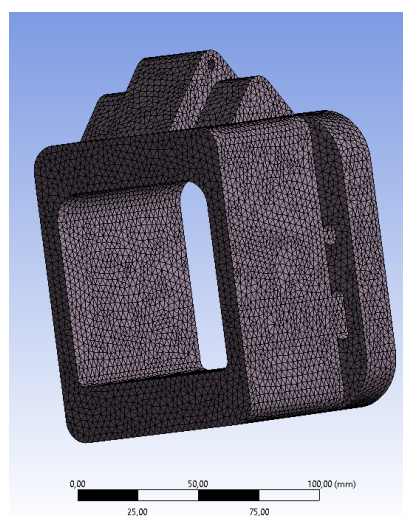


Fig. 4.E.1. Illustration du maillage réalisé sur la pièce du cas d'étude

Annexe 4.F

Données relatives aux essais de traction

Table 4.F.1 Synthèse des données géométriques des éprouvettes de traction selon la direction horizontale.

Ref	Longueur initiale L_0 mm	Ecart type L_0 mm	Section initiale S_0 mm	Ecart type S_0 mm	Longueur final L_f mm	Ecart type L_f mm
a-H1	61,00	0,02	16,35	0,05	72,99	0,03
a-H2	61,06	0,05	16,63	0,02	74,96	0,02
a-H3	61,00	0,01	16,64	0,04	73,09	0,04
b-H1	61,01	0,03	16,33	0,06	73,83	0,07
b-H2	61,01	0,02	16,64	0,00	74,35	0,13
b-H3	60,97	0,01	16,60	0,00	74,29	0,03
c-H1	60,97	0,01	16,64	0,00	73,74	0,12
c-H2	61,00	0,02	16,60	0,00	74,75	0,06
c-H3	60,99	0,01	16,64	0,00	75,29	0,05
d-H1	60,98	0,02	16,67	0,02	73,85	0,04
d-H2	60,98	0,01	16,60	0,00	74,91	0,02
d-H3	60,99	0,02	16,50	0,13	65,49	15,51
e-H1	60,98	0,02	16,60	0,00	74,05	0,01
e-H2	60,99	0,01	16,59	0,02	73,01	0,02
e-H3	60,98	0,02	16,57	0,05	73,56	0,03
f-H1	60,99	0,01	16,48	0,04	73,92	0,09
f-H2	60,98	0,01	16,59	0,02	75,04	0,04
f-H3	60,98	0,02	16,67	0,02	75,01	0,03
g-H1	61,00	0,02	16,67	0,02	74,50	0,12
g-H2	61,01	0,03	16,64	0,00	75,44	0,09
g-H3	61,03	0,03	16,68	0,04	74,76	0,03
h-H1	61,05	0,03	16,58	0,02	72,72	2,35
h-H2	60,97	0,01	16,68	0,04	74,71	0,10
h-H3	61,03	0,02	16,64	0,04	74,13	0,04
i-H1	61,00	0,01	16,70	0,02	75,07	0,07
i-H2	60,99	0,01	16,68	0,00	74,79	0,08
i-H3	60,99	0,02	16,79	0,02	75,18	0,03

Table 4.F.2 Synthèse des données géométriques des éprouvettes de traction selon la direction verticale.

Ref	Longueur initiale L_0 mm	Ecart type L_0 mm	Section initiale S_0 mm	Ecart type S_0 mm	Longueur finale L_f mm	Ecart type L_f mm
a-H1	61,05	0,04	16,97	0,04	77,55	0,02
a-H2	61,01	0,01	16,78	0,02	77,66	0,16
a-H3	61,03	0,01	17,83	0,03	77,38	0,04
b-H1	60,99	0,02	18,70	0,02	74,74	0,02
b-H2	61,03	0,03	16,71	0,02	75,04	0,07
b-H3	61,03	0,02	16,76	0,00	74,32	0,03
c-H1	61,01	0,02	16,15	0,02	75,68	0,01
c-H2	61,03	0,01	16,70	0,05	75,47	0,04
c-H3	61,04	0,01	17,31	0,02	76,99	0,04
d-H1	61,01	0,02	15,50	0,28	70,55	0,04
d-H2	60,99	0,01	17,74	0,02	76,69	0,08
d-H3	61,03	0,02	17,74	0,02	78,45	0,12
e-H1	61,03	0,02	17,63	0,03	73,57	0,03
e-H2	61,04	0,02	16,64	0,04	74,33	0,09
e-H3	61,01	0,02	16,59	0,05	74,92	0,03
f-H1	61,00	0,03	16,66	0,02	76,88	0,07
f-H2	61,02	0,02	18,37	0,00	73,72	0,04
f-H3	61,02	0,01	15,96	0,04	74,94	0,02
g-H1	61,00	0,01	15,69	0,05	77,75	0,02
g-H2	61,02	0,01	14,60	0,10	77,17	0,03
g-H3	61,04	0,02	16,74	0,25	77,07	0,05
h-H1	60,97	0,03	15,81	0,06	76,47	0,06
h-H2	61,00	0,02	15,76	0,04	77,13	0,07
h-H3	61,03	0,02	16,64	0,04	75,59	0,26
i-H1	60,99	0,02	16,78	0,02	76,89	0,01
i-H2	60,98	0,02	16,64	0,04	75,77	0,05
i-H3	61,00	0,02	15,69	0,02	77,22	0,05

Table 4.F.3 Synthèse des caractéristiques mécaniques obtenues par les essais de traction.

Ref	R_m (MPa)	Écart type	$R_{e0.2}$ (MPa)	Écart type	E (GPa)	Écart type	A (%)	Écart type
a-H	618,6	3,3	302,3	5,8	134,4	11,5	37,1%	2,2%
b-H	604,7	2,9	303,3	2,4	124,1	3,0	38,7%	1,3%
c-H	604,3	3,7	309,0	3,8	150,7	4,6	39,5%	1,8%
d-H	629,2	4,4	322,5	2,7	163,5	13,8	38,7%	1,3%
e-H	603,3	1,8	303,4	2,2	99,5	20,3	37,3%	1,6%
f-H	608,6	4,2	315,5	5,8	153,3	6,3	39,7%	1,8%
g-H	623,2	7,6	303,6	8,3	139,9	6,7	39,9%	1,1%
h-H	600,9	4,1	299,5	4,4	117,6	2,1	37,6%	1,5%
i-H	596,2	1,3	304,0	1,7	126,0	7,8	40,7%	0,5%
a-V	585,7	1,9	296,5	3,6	178,3	5,6	48,8%	0,8%
b-V	589,0	2,9	286,1	3,4	140,3	21,8	40,4%	0,8%
c-V	577,1	1,0	291,6	9,1	116,5	10,5	44,0%	1,9%
d-V	575,0	13,5	274,9	2,4	129,2	24,7	48,6%	2,2%
e-V	602,4	3,5	289,1	3,9	110,1	9,9	38,9%	1,4%
f-V	576,1	9,5	312,6	11,3	154,1	31,4	41,7%	3,7%
g-V	544,1	17,9	258,0	7,0	141,3	19,8	47,4%	1,0%
h-V	543,8	4,4	272,3	9,3	117,9	13,4	45,0%	1,6%
i-V	558,0	6,5	297,2	3,6	151,1	5,8	45,1%	1,7%

Annexe 4.G

Résultats de l'ACV pour les catégories d'impact intermédiaires

Table 4.G.1 Résultats de l'ACV pour la pièce (a) : impacts intermédiaires.

Catégorie d'impacts intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électricité	Transport	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,003	0,001	0,001	0,012
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,079	0,432	0,143	0,239	3,098
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,057	0,009	0,001
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	14,692	3,438	0,609	0,666	23,455
Toxicité humaine cancérigène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,043	0,012	0,052
Toxicité humaine non-cancérigène	kg 1,4-DCB	0,140	0,069	1,519	0,453	0,561
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq		0,006	6,586	0,015	
Utilisation des sols	m2a crop eq	29,623	0,642	0,017	0,050	25,705
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,002	0,074	0,020	0,031
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,660	0,001	0,008	0,001	2,149
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,048	0,021	0,001	0,003	0,099
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,048	0,021	0,001	0,003	0,099
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,019	0,014	0,003	0,002	0,045
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,659	0,659	3,459	16,009	88,984
Consommation d'eau	m3	0,169	0,864	0,036	0,002	0,545

Table 4.G.2 Résultats de l'ACV pour la pièce (b) : impacts intermédiaires.

Catégorie d'impacts intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électri cité	Transp ort	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,003	0,001	0,001	0,012
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,143	0,445	0,147	0,247	3,193
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,059	0,009	0,001
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	15,147	3,545	0,627	0,687	24,181
Toxicité humaine cancérogène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,044	0,013	0,054
Toxicité humaine non-cancérogène	kg 1,4-DCB	0,144	0,071	1,566	0,468	0,578
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq		0,007	6,789	0,016	
Utilisation des sols	m2a crop eq	30,540	0,662	0,018	0,052	26,500
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,002	0,076	0,021	0,032
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,712	0,001	0,008	0,001	2,216
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,049	0,022	0,001	0,003	0,102
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,049	0,022	0,001	0,003	0,102
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,020	0,015	0,003	0,002	0,047
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,896	0,679	3,566	16,505	91,738
Consommation d'eau	m3	0,174	0,891	0,038	0,002	0,562

Table 4.G.3 Résultats de l'ACV pour la pièce (c) : impacts intermédiaires.

Catégorie d'impacts intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électri cité	Transp ort	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,003	0,001	0,001	0,014
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,143	0,427	0,173	0,259	3,619

Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,069	0,010	0,001
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	15,143	3,395	0,738	0,722	27,404
Toxicité humaine cancérigène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,052	0,013	0,061
Toxicité humaine non-cancérigène	kg 1,4-DCB	0,144	0,068	1,842	0,492	0,655
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq	0,000	0,006	7,985	0,017	0,000
Utilisation des sols	m2a crop eq	30,530	0,634	0,021	0,054	30,033
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,002	0,089	0,022	0,036
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,711	0,001	0,009	0,001	2,511
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,049	0,021	0,002	0,003	0,115
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,049	0,021	0,002	0,003	0,115
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,020	0,014	0,003	0,002	0,053
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,894	0,650	4,194	17,354	103,96
Consommation d'eau	m3	0,174	0,853	0,044	0,002	0,637

Table 4.G.4 Résultats de l'ACV pour la pièce (d) : impacts intermédiaires.

Catégorie d'impacts intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électricité	Transport	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,004	0,001	0,001	0,010
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,145	0,566	0,136	0,241	2,653
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,054	0,009	0,001
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	15,161	4,504	0,581	0,672	20,092
Toxicité humaine cancérigène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,041	0,012	0,045

Toxicité humaine non-cancérogène	kg 1,4-DCB	0,144	0,090	1,449	0,457	0,481
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq	0,000	0,008	6,282	0,015	0,000
Utilisation des sols	m2a crop eq	30,567	0,842	0,016	0,051	22,019
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,003	0,070	0,021	0,026
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,713	0,001	0,007	0,001	1,841
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,049	0,028	0,001	0,003	0,084
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,049	0,028	0,001	0,003	0,084
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,020	0,019	0,002	0,002	0,039
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,903	0,863	3,299	16,143	76,226
Consommation d'eau	m3	0,174	1,132	0,035	0,002	0,467

Table 4.G.5 Résultats de l'ACV pour la pièce (e) : impacts intermédiaires.

Catégorie d'impacts intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électricité	Transport	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,003	0,001	0,001	0,012
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,144	0,452	0,151	0,247	3,167
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,060	0,009	0,001
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	15,152	3,597	0,643	0,686	23,977
Toxicité humaine cancérogène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,045	0,013	0,053
Toxicité humaine non-cancérogène	kg 1,4-DCB	0,144	0,072	1,605	0,467	0,574
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq	0,000	0,007	6,958	0,016	0,000
Utilisation des sols	m2a crop eq	30,550	0,672	0,018	0,052	26,277
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,002	0,078	0,021	0,031
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,712	0,001	0,008	0,001	2,197

Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,049	0,022	0,001	0,003	0,101
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,049	0,022	0,001	0,003	0,101
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,020	0,015	0,003	0,002	0,046
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,899	0,689	3,654	16,493	90,966
Consommation d'eau	m3	0,174	0,904	0,038	0,002	0,557

Table 4.G.6 Résultats de l'ACV pour la pièce (f) : impacts intermédiaires.

Catégorie d'impacts intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électri cité	Transp ort	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,003	0,001	0,001	0,012
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,145	0,455	0,187	0,247	3,174
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,075	0,009	0,001
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	15,160	3,618	0,795	0,688	24,032
Toxicité humaine cancérogène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,056	0,013	0,053
Toxicité humaine non-cancérogène	kg 1,4-DCB	0,144	0,072	1,986	0,468	0,575
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq	0,000	0,007	8,606	0,016	0,000
Utilisation des sols	m2a crop eq	30,566	0,676	0,022	0,052	26,337
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,002	0,096	0,021	0,031
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,713	0,001	0,010	0,001	2,202
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,049	0,022	0,002	0,003	0,101
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,049	0,022	0,002	0,003	0,101
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,020	0,015	0,003	0,002	0,046
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,903	0,693	4,520	16,532	91,174

Consommation d'eau	m3	0,174	0,909	0,048	0,002	0,558
--------------------	----	-------	-------	-------	-------	-------

Table 4.G.7 Résultats de l'ACV pour la pièce (g) : impacts intermédiaires

Catégorie d'impacts intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électricité	Transport	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,004	0,001	0,001	0,010
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,145	0,552	0,131	0,237	2,570
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,052	0,009	0,001
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	15,161	4,397	0,560	0,660	19,456
Toxicité humaine cancérogène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,039	0,012	0,043
Toxicité humaine non-cancérogène	kg 1,4-DCB	0,144	0,088	1,397	0,449	0,465
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq	0,000	0,008	6,056	0,015	0,000
Utilisation des sols	m2a crop eq	30,567	0,821	0,016	0,050	21,323
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,003	0,068	0,020	0,025
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,713	0,001	0,007	0,001	1,783
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,049	0,027	0,001	0,003	0,082
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,049	0,027	0,001	0,003	0,082
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,020	0,018	0,002	0,002	0,038
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,903	0,842	3,180	15,848	73,815
Consommation d'eau	m3	0,174	1,105	0,033	0,002	0,452

Table 4.G.8 Résultats de l'ACV pour la pièce (h) : impacts intermédiaires.

Catégorie d'impacts	Flux				
	Substrat	Gaz	Électricité	Transport	Fil 316L

intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électri cité	Transp ort	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,003	0,001	0,001	0,011
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,145	0,422	0,145	0,234	2,908
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,058	0,009	0,001
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	15,160	3,355	0,617	0,652	22,020
Toxicité humaine cancérigène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,043	0,012	0,049
Toxicité humaine non-cancérigène	kg 1,4-DCB	0,144	0,067	1,542	0,444	0,527
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq	0,000	0,006	6,682	0,015	0,000
Utilisation des sols	m2a crop eq	30,566	0,627	0,017	0,049	24,132
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,002	0,075	0,020	0,029
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,713	0,001	0,008	0,001	2,018
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,049	0,021	0,001	0,003	0,093
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,049	0,021	0,001	0,003	0,093
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,020	0,014	0,003	0,002	0,042
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,903	0,643	3,509	15,671	83,539
Consommation d'eau	m3	0,174	0,843	0,037	0,002	0,512

Table 4.G.9 Résultats de l'ACV pour la pièce (h) : impacts intermédiaires.

Catégorie d'impacts intermédiaires	Unité de référence	Flux				
		Substrat	Gaz	Électri cité	Transp ort	Fil 316L
Formation de particules fines	kg PM2.5 eq	0,006	0,003	0,001	0,001	0,012
Raréfaction des ressources fossiles	kg oil eq	2,143	0,421	0,168	0,245	3,215
Écotoxicité des eaux douces	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,067	0,009	0,001

Eutrophisation des eaux douces	kg P eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	15,145	3,352	0,717	0,682	24,346
Toxicité humaine cancérigène	kg 1,4-DCB	0,000	0,002	0,050	0,013	0,054
Toxicité humaine non-cancérigène	kg 1,4-DCB	0,144	0,067	1,790	0,464	0,582
Rayonnement ionisant	kBq Co-60 eq	0,000	0,006	7,756	0,016	0,000
Utilisation des sols	m2a crop eq	30,535	0,626	0,020	0,051	26,682
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DCB	0,002	0,002	0,087	0,021	0,032
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Raréfaction des ressources minérales	kg Cu eq	1,712	0,001	0,009	0,001	2,231
Formation d'ozone, Santé humaine	kg NOx eq	0,049	0,021	0,002	0,003	0,102
Formation d'ozone, Terrestre	kg NOx eq	0,049	0,021	0,002	0,003	0,102
Raréfaction de l'ozone stratosphérique	kg CFC11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidification des sols	kg SO2 eq	0,020	0,014	0,003	0,002	0,047
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB	7,895	0,642	4,073	16,376	92,366
Consommation d'eau	m3	0,174	0,842	0,043	0,002	0,566

Annexes du Chapitre 5

Annexe 5.A

Code Matlab

Code développé pour l'optimisation avec NSGA II sous contrainte et intégrant des variables discrètes.

Programme principal

```
%appel de la fonction principal
%programme à faire tourner pour lancer l'optimisation tous les paramètres doivent
être définis en amont
% sauvegarde des alternatives en fichier .csv pour import interface décision

optimisation_nsgaII_discrete;

% Extraire le nombre d'alternatives du front de pareto #1
num_alts = length(F1);
% Initialiser une matrice pour stocker les données
num_params = length(F1(1).Alternative);
num_criteria = length(F1(1).Fitness);
num_col = num_params + num_criteria + 1;
data = zeros(num_alts, num_col);
% Remplir la matrice avec les données de la structure
for i = 1:num_alts
    data(i,num_col)=F1(i).Gen;
    for j = 1:num_params
        data(i,j) = F1(i).Alternative(j);
        for k = 1:num_criteria
            data(i,k+num_params) = F1(i).Fitness(k);
        end
    end
end

% inverser colonne précision dimensionnelle
for i =1:num_alts
    data(i,5)=-data(i,5)*100;
end

% Écrire la matrice dans un fichier CSV avec des en-têtes de colonnes
col_names = {'WFS', 'TS', 'Coût(DESC)', 'Temps de fabrication(DESC)', 'Précision
dimensionnelle (%)', 'Eco-score(DESC)', 'Génération'};
header = col_names;
csv_data = [header; num2cell(data)];
writecell(csv_data, 'exportnsga.csv', 'Delimiter', ',', 'Encoding', 'UTF-8')
```

Programme d'optimisation avec les paramètres à définir

```
clc;
clear;
close all;
%% Problem Definition
FitnessFunction = @(x) Fonctions_objectif(x); % FitnessFunction
ConstraintFunction = @(x) Fonctions_contrainte(x); %constraint function
```

```

nVar = 2; % Number of Decision Variables
VarSize = [1 nVar]; % Size of Decision Variables Matrix
VarMin = [4.9 0.594]; % Lower Bounds of Variables in m/min
VarMax = [10.0 0.900]; % Upper Bound of Variables in m/min
Varstep = [0.1 0.006]; %Variable steps in m/min
Nstep=round((VarMax-VarMin)./Varstep);
% Number of Objective Functions
nObj = numel(FitnessFunction(unifrnd(VarMin, VarMax, VarSize)));
% Number of Constraints
nCons = numel(ConstraintFunction(unifrnd(VarMin, VarMax, VarSize)));
C1 = ****; % Constraint limits (vector if many constraints) according
to specifications (confidential)
%% NSGA-II Parameters
MaxIt = 20; % Maximum Number of Iterations
nPop = 50; % Population Size
pCrossover = 0.7; % Crossover Percentage
nCrossover = 2*round(pCrossover*nPop/2); % Number of Parents (Offsprings)
pMutation = 0.4; % Mutation Percentage
nMutation = round(pMutation*nPop); % Number of Mutants
mu = 0.02; % Mutation Rate
sigma = 0.1*(VarMax-VarMin); % Mutation Step Size
%% Initialization
empty_individual.Alternative = [];
empty_individual.Fitness = [];
empty_individual.Constraint = [];
empty_individual.Rank = [];
empty_individual.DominationSet = [];
empty_individual.DominatedCount = [];
empty_individual.CrowdingDistance = [];
empty_individual.Gen = [];
pop = repmat(empty_individual, nPop, 1);
N = compute_round_precision(Varstep,nVar);
i=1;
while i <= nPop
    l=unidrnd(Nstep, VarSize);
    pop(i).Alternative = VarMin + l.*Varstep;
    pop(i).Fitness = FitnessFunction(pop(i).Alternative);
    pop(i).Constraint = ConstraintFunction(pop(i).Alternative);
    pop(i).Gen = 1;
    isUnique = 0;
    for j = 1 : i
        if isequal(pop(i).Alternative, pop(j).Alternative)
            isUnique = isUnique + 1;
        end
    end
    if isUnique ==1
        i = i + 1;
    end
end
%%
% Non-Dominated Sorting
[pop, F] = Tri_non_domination(pop, C1);
% Calculate Crowding Distance
pop = distance_encombremment(pop, F);
% Sort Population
[pop, F] = Tri_pop(pop);
%% NSGA-II Main Loop
for it = 1:MaxIt
    % Crossover

```

```

popc = repmat(empty_individual, nCrossover/2, 2);
k=1;
while k <= nCrossover/2
    i1 = randi([1 nPop]);
    p1 = pop(i1);

    i2 = randi([1 nPop]);
    p2 = pop(i2);
    [popc(k, 1).Alternative, popc(k, 2).Alternative] =
croisement_discret(p1.Alternative, p2.Alternative, N);
    popc(k, 1).Fitness = FitnessFunction(popc(k, 1).Alternative);
    popc(k, 2).Fitness = FitnessFunction(popc(k, 2).Alternative);
    popc(k, 1).Constraint = ConstraintFunction(popc(k, 1).Alternative);
    popc(k, 2).Constraint = ConstraintFunction(popc(k, 2).Alternative);
    popc(k, 1).Gen = it;
    popc(k, 2).Gen = it;
    isUnique = true;
    for j = 1 : nPop
        if isequal(popc(k, 1).Alternative, pop(j).Alternative) ||
isequal(popc(k, 2).Alternative, pop(j).Alternative)
            isUnique = false;
            break;
        end
    end
    if isUnique
        k = k + 1;
    end
end
popc = popc(:);
% Mutation
popm = repmat(empty_individual, nMutation, 1);
k=1;

while k <= nMutation
    i = randi([1 nPop]);
    p = pop(i);
    popm(k).Alternative = Mutation_discrete(p.Alternative, mu, sigma, VarMin,
VarMax, N);
    popm(k).Fitness = FitnessFunction(popm(k).Alternative);
    popm(k).Constraint = ConstraintFunction(popm(k).Alternative);
    popm(k).Gen = it;
    isUnique = true;
    for j = 1 : nPop
        if isequal(popm(k).Alternative, pop(j).Alternative)
            isUnique = false;
            break;
        end
    end
    if isUnique
        k = k + 1;
    end
end
% Merge
pop = [pop
      popc
      popm];
% Non-Dominated Sorting
[pop, F] = Tri_non_domination(pop, C1);

```

```

% Calculate Crowding Distance
pop = distance_encablement(pop, F);
% Sort Population
[pop, F] = Tri_pop(pop);
% Truncate
pop = pop(1:nPop);
% Non-Dominated Sorting
[pop, F] = Tri_non_domination(pop, C1);
% Calculate Crowding Distance
pop = distance_encablement(pop, F);
%Sort Population
[pop, F] = Tri_pop(pop);
%Store F1
F1 = pop(F{1});
% Show Iteration Information
disp(['Iteration ' num2str(it) ': Number of F1 Members = '
num2str(numel(F1))]);
end
%% Results
% %      Plot F1
figure(1);
Tracer_fronts(F1, nObj);

```

Fonctions objectif et contrainte

```

%fitness function objective are to be minimized. for a criteria needed to
%be maximized multiply the function by *(-1)
function z = Fonctions_objectif(x)
    z1 = 386.26338 - 29.775565*x(1) - 31.454546*x(2) + 1.84851*x(1)^2; % fonction
    cout total de fabrication d'une pièce en WAAM en euro
    z2 = 268.4 - 43.2*x(1) + 43.3*x(2) + 2.4*x(1)^2 - 36.6*x(2)^2; % fonction
    temps de fabrication effectif en minute
    z3 = 102.13363 - 0.526755*x(1) - 2.24155*x(2) + 0.44359*x(1)*x(2); % fonction
    précision dimensionnelle en % de la hauteur de la pièce
    z4 = 1.1919 + 0.019184*x(1) - 0.222057*x(2); %fonction eco-score en PTS
    z = [z1 z2 -1*z3 z4]';
end

% fonction contrainte
function c = Fonctions_contrainte(x)
    c1 = 2912.02299 + 7.43678*x(1) + 8091.76245*x(2) - 1.6469*x(1)^2 -
    5790.8046*x(2)^2 ;
    c = c1;
end

```

Fonction mutation

```

function y = Mutation_discrete(x, mu, sigma, Min, Max, Nround)
    nVar = numel(x);
    nMu = ceil(mu*nVar);
    j = randsample(nVar, nMu);
    if numel(sigma)>1
        sigma = sigma(j);
    end
    y = x;
    y(j) = x(j)+sigma.*randn(size(j));
    y(j) = round(y(j),Nround(j));

```



```

    y(j) = max(min(y(j), Min(j)), Max(j)); % étape nécessaire pour s'assurer que
    les gènes restent dans les limites définie
end

```

Fonction croisement

```

function [y1, y2] = croisement_discret(x1, x2, Nround)
    alpha = rand(size(x1));
    y1 = alpha.*x1+(1-alpha).*x2;
    y2 = alpha.*x2+(1-alpha).*x1;
    for i=1:length(x1)
        y1(i)=round(y1(i),Nround(i));
        y2(i)=round(y2(i),Nround(i));
    end
end

```

Fonction domination sous contrainte

```

function b = domination_avec_contrainte(x, y, C)

    if isstruct(x)
        x_fit = x.Fitness;
        x_cons = x.Constraint;
    end

    if isstruct(y)
        y_fit = y.Fitness;
        y_cons = y.Constraint;
    end

    if all(x_cons > C) && all(y_cons > C)
        b = all(x_fit < y_fit) && any(x_fit <= y_fit);
    elseif all(x_cons > C) && all(y_cons <= C)
        b = true;
    elseif all(x_cons <= C) && all(y_cons <= C)
        b = (x_cons > y_cons);
    else
        b = false;
    end

end

```

Fonction distance d'encombrement

```

function pop = distance_encombrement(pop, F)

    nF = numel(F);
    for k = 1:nF
        Fitness = [pop(F{k}).Fitness];
        nObj = size(Fitness, 1);
        n = numel(F{k});
        d = zeros(n, nObj);
        for j = 1:nObj
            [cj, so] = sort(Fitness(j, :));
            d(so(1), j) = inf;
            for i = 2:n-1
                d(so(i), j) = abs(cj(i+1)-cj(i-1))/abs(cj(1)-cj(end));
            end
            d(so(end), j) = inf;
        end
    end
end

```

```

    end
    for i = 1:n
        pop(F{k}(i)).CrowdingDistance = sum(d(i, :));
    end
end
end
end

```

Fonction tri non domination

```

function [pop, F] = Tri_non_domination(pop, C1)
    nPop = numel(pop);
    for i = 1:nPop
        pop(i).DominationSet = [];
        pop(i).DominatedCount = 0;
    end
    F{1} = [];
    for i = 1:nPop
        for j = i+1:nPop
            p = pop(i);
            q = pop(j);
            if domination_avec_contrainte(p, q, C1)
                p.DominationSet = [p.DominationSet j];
                q.DominatedCount = q.DominatedCount+1;
            end
            if domination_avec_contrainte(q, p, C1)
                q.DominationSet = [q.DominationSet i];
                p.DominatedCount = p.DominatedCount+1;
            end
            pop(i) = p;
            pop(j) = q;
        end
        if pop(i).DominatedCount == 0
            F{1} = [F{1} i];
            pop(i).Rank = 1;
        end
    end
    k = 1;
    while true
        Q = [];
        for i = F{k}
            p = pop(i);
            for j = p.DominationSet
                q = pop(j);
                q.DominatedCount = q.DominatedCount-1;
                if q.DominatedCount == 0
                    Q = [Q j]; %#ok
                    q.Rank = k+1;
                end
            end
            pop(j) = q;
        end
        if isempty(Q)
            break;
        end
        F{k+1} = Q; %#ok
        k = k+1;
    end
end
end

```

Fonction tri population

```

function [pop, F] = Tri_pop(pop)
    % Sort Based on Crowding Distance
    [~, CDSO] = sort([pop.CrowdingDistance], 'descend');
    pop = pop(CDSO);
    % Sort Based on Rank
    [~, RSO] = sort([pop.Rank]);
    pop = pop(RSO);
    % Update Fronts
    Ranks = [pop.Rank];
    MaxRank = max(Ranks);
    F = cell(MaxRank, 1);
    for r = 1:MaxRank
        F{r} = find(Ranks == r);
    end
end

```

Fonction Tracer

```

function Tracer_fronts(pop,nObj)

    Fitness = [pop.Fitness] ;
    titles = {'Coût vs Temps de fabrication', ...
             'Coût vs Précision dimensionnelle', ...
             'Temps de fabrication vs Précision dimensionnelle',...
             'Coût vs Eco-score'};
    x_labels = {'Coût en €', 'Coût en €', ...
               'Temps de fabrication en min','Coût en €'};
    y_labels= {'Temps de fabrication en min', 'Précision dimensionnelle', ...
              'Précision dimensionnelle', 'Eco-score'}
    for i = 1:nObj
        subplot(2, 2, i);
        switch i
            case 1
                scatter(Fitness(1,:), Fitness(2,:), 'r*');
            case 2
                scatter(Fitness(1,:), -Fitness(3,:), 'r*');
            case 3
                scatter(Fitness(2,:), -Fitness(3,:), 'r*');
            case 4
                scatter(Fitness(1,:), Fitness(4,:), 'r*');
        end
        xlabel(x_labels{i});
        ylabel(y_labels{i});
        title(titles{i});
        grid on;
    end
end

```

Annexe 5.B

Alternatives Pareto-optimales obtenues par NSGA II

Alternatives sous format txt, telles qu'importées dans TAMARIN.

WFS,TS,Coût(DESC),Temps de fabrication(DESC),Précision dimensionnelle (%),Eco-score(DESC),Génération

5,0.702,261.517213708,124.7599736,9948.32878,1.131935986,1
8.1,0.9,238.0529532,85.268,9908.32906,1.1474391,4
9,0.9,239.7035136,83.324,9896.8519,1.1647047,4
5,0.9,255.2892136,121.724,9947.8615,1.0879687,6
5.1,0.9,254.1786522,119.828,9946.58626,1.0898871,5
5.5,0.9,250.1061086,112.724,9941.4853,1.0975607,4
5.9,0.9,246.6250882,106.388,9936.38434,1.1052343,6
5.7,0.9,248.291658,109.46,9938.93482,1.1013975,3
5,0.835,257.33375909,123.037065,9948.0149,1.102402405,19
6,0.9,245.8472586,104.924,9935.1091,1.1071527,5
6.1,0.9,245.1063992,103.508,9933.83386,1.1090711,5
6.2,0.9,244.40251,102.14,9932.55862,1.1109895,5
6.3,0.9,243.735591,100.82,9931.28338,1.1129079,4
6.4,0.9,243.1056422,99.548,9930.00814,1.1148263,1
6.6,0.9,241.9566552,97.148,9927.45766,1.1186631,5
7.9,0.9,238.0928342,86.22799999999999,9910.87954,1.1436023,1
6.5,0.9,242.5126636,98.324,9928.7329,1.1167447,2
6.9,0.9,240.5104512,93.90799999999999,9923.63194,1.1244183,2
6.7,0.9,241.437617,96.01999999999999,9926.18242,1.1205815,3
7,0.9,240.1023236,92.92399999999999,9922.3567,1.1263367,2
6.8,0.9,240.955549,94.94,9924.90718,1.1224999,7
5,0.772,259.315395488,124.0145856,9948.16358,1.116391996,19
8.7,0.9,238.820595,83.53999999999999,9900.67762,1.1589495,5
8.9,0.9,239.3722372,83.348,9898.12714,1.1627863,1
7.1,0.9,239.7311662,91.98799999999999,9921.08146,1.1282551,9
7.4,0.9,238.8395152,89.46799999999999,9917.25574,1.1340103,4
5,0.888,255.666668152,121.9896896,9947.88982,1.090633384,19
7.5,0.9,238.6162386,88.724,9915.9805,1.1359287,2
5.2,0.9,253.105061,117.98,9945.31102,1.0918055,8
7.6,0.9,238.4299322,88.028,9914.70526,1.1378471,2
7.2,0.9,239.396979,91.1,9919.80622,1.1301735,3
7.3,0.9,239.099762,90.25999999999999,9918.53098,1.1320919,2
5.3,0.9,252.06844,116.18,9944.03578,1.0937239,4
7.7,0.9,238.280596,87.38,9913.43002,1.1397655,7
5.4,0.9,251.0687892,114.428,9942.76054,1.0956423,2
5,0.6,264.7255774,125.20,9948.5694,1.1545858,4
5,0.749,260.038850046,124.2990634,9948.21786,1.121499307,14
7.8,0.9,238.16823,86.77999999999999,9912.15478,1.1416839,4
5.4,0.9,251.0687892,114.428,9942.76054,1.0956423,2
5.6,0.9,249.1803982,111.068,9940.21006,1.0994791,5
5,0.63,263.781941,125.15246,9948.4986,1.1479241,8
5.6,0.9,249.1803982,111.068,9940.21006,1.0994791,5
5,0.84,257.17648636,122.94,9948.003,1.10129212,5
8.2,0.9,238.088468,84.85999999999999,9907.05382,1.1493575,9
8.30,0.9,238.160953,84.5,9905.77858,1.1512759,4
8.4,0.9,238.2704082,84.18799999999999,9904.50334,1.1531943,12
8.5,0.9,238.4168336,83.92399999999999,9903.2281,1.1551127,4
8.6,0.9,238.6002292,83.708,9901.95286,1.1570311,12
5.8,0.9,247.439888,107.9,9937.65958,1.1033159,3
5,0.707,261.359940978,124.7186266,9948.31698,1.130825701,18

Annexe 5.C

Détails des calculs réalisés par TAMARIN

Détail du calcul pour les cinq alternatives du scénario 3 (cf. section 5.5.3).

		Critères				Somme
		$d\%$ (%)	t_f (min)	C_f (€)	Eco - score Pts	
Scénario 3	Importance z_a	7,26	6,51	6,95	7,21	27,93
	Granularité y_a	10%	0%	3%	5%	-
	max_a	99,49	125	264,7	1,165	-
	min_a	98,97	83	238,1	1,088	-
Alternative 1 WFS = 5 m/min TS = 0,9 m/min	Valeurs V_a	99,48	122	255,3	1,088	-
	$Intervalle_sup_a$	99,53	-	256,1	1,092	-
	$Intervalle_inf_a$	99,43	-	254,5	1,084	-
	dom_locale_a	30	9	8	43	-
	$dom_normalisée_a$	0,97	0,18	0,24	1	-
	$score_a$	0,25	0,04	0,06	0,26	0,61
Alternative 2 WFS = 5,8 m/min TS = 0,9 m/min	Valeurs V_a	99,38	108	247,4	1,103	-
	$Intervalle_sup_a$	99,43	-	248,2	1,107	-
	$Intervalle_inf_a$	99,32	-	246,6	1,099	-
	dom_locale_a	22	19	18	33	-
	$dom_normalisée_a$	0,71	0,39	0,53	0,77	-
	$score_a$	0,18	0,09	0,13	0,2	0,60
Alternative 3 WFS = 5,1 m/min TS = 0,9 m/min	Valeurs V_a	99,47	120	254,2	1,090	-
	$Intervalle_sup_a$	99,52	-	255,0	1,094	-
	$Intervalle_inf_a$	99,41	-	253,4	1,086	-
	dom_locale_a	29	10	8	42	-
	$dom_normalisée_a$	0,94	0,2	0,24	0,98	-
	$score_a$	0,24	0,05	0,06	0,25	0,60
Alternative 4 WFS = 5,2 m/min TS = 0,9 m/min	Valeurs V_a	99,45	118	253,1	1,092	-
	$Intervalle_sup_a$	99,50	-	253,9	1,096	-
	$Intervalle_inf_a$	99,40	-	252,3	1,088	-
	dom_locale_a	28	11	10	40	-
	$dom_normalisée_a$	0,9	0,22	0,29	0,93	-
	$score_a$	0,23	0,05	0,07	0,24	0,60
Alternative 5 WFS = 5,6 m/min TS = 0,9 m/min	Valeurs V_a	99,40	111	249,1	1,099	-
	$Intervalle_sup_a$	99,45	-	250,0	1,103	-
	$Intervalle_inf_a$	99,35	-	248,4	1,096	-
	dom_locale_a	24	16	15	35	-
	$dom_normalisée_a$	0,81	0,33	0,44	0,77	-
	$score_a$	0,20	0,08	0,11	0,21	0,60

Annexe de la Conclusion

Annexe 6.A

Valorisation scientifique des contributions présentées

Articles publiés dans des revues indexées dans une base de données

1. **Terrenoir L.**, Lartigau J., Arjunan A., Laguna Salvado L., and Merlo C. (2023, August). "Influence of Wire Feed Speed and Torch Speed on the Mechanical Properties of Wire Arc Additively Manufactured Stainless Steel." *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* October 2023; 145(10): 101012. <https://doi.org/10.1115/1.4063108>.

Communications dans des congrès internationaux

2. **Terrenoir L.**, Laguna Salvado L., Merlo C., Lartigau J. et Arjunan A. (2023, June) Paramètres de fabrication additive métallique arc-fil : vers un modèle d'aide à la décision. In *CIGI Qualita MOSIM 2023*, Trois-Rivières, Québec, Canada. DOI : 10.60662/9HSW-JS95

Communications dans des congrès nationaux

3. **Terrenoir, L.**, Lartigau, J., Merlo, C., Laguna Salvadó, L. & Arjunan, A. (2022, August). Méthodologie pour le développement d'une gamme opératoire pour la fabrication additive métallique. In *CFM2022-25^e Congrès Français de Mécanique*.
4. Lartigau, J., Milhomme, S., & **Terrenoir, L.** (2021, August). Étude du comportement mécanique de pièces métalliques fabriquées par procédés DED. In *Congrès des Jeunes Chercheurs en Mécanique (Méca-J)*.