HAL
open science

Conception et fabrication de pièces métalliques intelligentes par procédé WAAM

Pascal Robert

To cite this version:

Pascal Robert. Conception et fabrication de pièces métalliques intelligentes par procédé WAAM. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALI055 . tel-03824895

HAL Id: tel-03824895

https://theses.hal.science/tel-03824895v1

Submitted on 21 Oct 2022

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

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Génie Industriel, Conception et Production**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Pascal ROBERT

Thèse dirigée par **Henri PARIS**

Co-encadrée par **Nicolas BERAUD** et **Matthieu MUSEAU**

préparée au sein du laboratoire **G-SCOP :**
Laboratoire de Grenoble des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production
dans l'École Doctorale **I-MEP2 :**
Ingénierie – Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production

Conception et fabrication de pièces métalliques intelligentes par procédé WAAM

Design and manufacturing of metallic smart parts with WAAM technology

Thèse soutenue publiquement le **1 juillet 2022,**
devant le jury composé de :

M. Sylvain LAVERNHE
Professeur des Universités, Université Paris-Saclay, Rapporteur
M. Olivier KERBRAT
Maître de Conférence, ENS Rennes, Rapporteur
M. Emmanuel DUC
Professeur des Universités, SIGMA Clermont, Président du Jury
M. Skandar BASROUR
Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes, Examinateur
M. Henri PARIS
Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse
M. Nicolas BERAUD
Maître de Conférence, Université Grenoble Alpes, Co-Encadrant de thèse
M. Matthieu MUSEAU
Maître de Conférence, Université Grenoble Alpes, Co-Encadrant de thèse

Remerciements

Ces travaux de thèses ont ainsi duré trois ans et demi et ont pu être menés à bien grâce à de nombreuses personnes qui m'ont permis de faire face à de nombreuses difficultés (crise covid, machines en panne, déménagement et immobilisation robot …) et m'ont aidé dans l'élaboration de ce manuscrit.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres de mon jury de thèse, merci à Olivier Kerbrat et Sylvain Lavernhe, tous deux rapporteurs de mon manuscrit pour leurs remarques ainsi que pour les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir lors de ma soutenance. Merci également à Emmanuel Duc d'avoir accepté de présider mon jury de thèse et de l'avoir fait avec humour et bienveillance.

J'ai pu réaliser ces travaux sous l'encadrement et l'accompagnement de trois personnes, Henri, Matthieu et Nicolas. Je tiens à remercier Henri d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse, de m'avoir accompagné et d'avoir accepté que Nicolas rentre dans mon encadrement. Merci à Matthieu également pour son amitié, sa bonne humeur et son regard éclairé sur mes travaux. Merci à Nicolas. Ces travaux n'auraient pu être achevé sans ton aide, ton accompagnement permanent et ton amitié. Je pense être grâce à toi et Matthieu un meilleur chercheur et une meilleure personne.

Merci également à Skandar et Thibault. Le partenariat avec le TIMA au cours du projet FAIR a été très enrichissant et j'ai apprécié travailler et discuter avec vous.

Merci à Marie-Jo, la maman du G-SCOP et à tous les personnels techniques et administratifs qui ont pu rendre ces travaux possibles sur les diverses entités avec lesquelles j'ai collaboré

Merci tout particulier à Frédéric d'avoir été mon professeur et de m'avoir lancé avec Philippe sur la voie de la fabrication additive il y a quelques années de cela. Merci de m'avoir proposé ce poste d'ingénieur sur le WAAM qui a mené à cette thèse.

Un merci particulier également à Maxime. Merci de m'avoir supporté pendant 4 ans dans le bureau que nous partageons et merci pout ton soutient permanent et le rôle clé que tu as pris au sein de l'équipe.

Merci à vous : Jeff, Alain, Camille, Bao, Thierry pour votre aide et votre bonne humeur sur GINOVA.

Merci à vous : Margaux, Victor, Cléa, Cléophée, Maud, Cédric, Florian, Valentin B., Astor, Hugo, Lucie, Gricha, Valentin G., Barzo, Alexandre T., Antoine, Tor, Emilio, Anthony, Pierre-Thomas, Hoang, Mansour, Erfan, Akram, Sergio, Christelle, Franck, Philippe, François, Guy, El Hadi, Thibaud, Amer, Manoch, Asiye, Bilge, Akash, Marco, Léa, Ernest, Camille, Ugo, Florence, Luc, Alexandre P., Tom, Clément, Piel, Lucie et Quentin. Que de bon souvenirs ensemble !

Merci à tous ceux que j'ai pu oublier et qui m'ont aidé par leur présence et leur amitié aux cours de ces années.

Merci à ma famille de m'avoir éduqué, de m'avoir supporté dans mes choix de vie. Merci Papa, Maman, Pierre, Marie-Jo, Céline et Michel.

Merci Mamie, ton courage et ta gentillesse m'ont marqué à jamais.

English Summary

Industry 4.0 highlights the need for massive data collection and therefore relies partly on the use of smart parts that are capable of providing data when they are used. In addition, metal additive manufacturing technologies seem to be a way to easily make smart parts and particularly the Wire & Arc Additive Manufacturing (WAAM) process that uses arc-welding technology. This raises the following issue, how to manufacture and design a smart metal part by WAAM? The research scope is limited to stress measurement in aluminum alloys parts. In order to answer this problem, four scientific issues are identified and resolved in this manuscript:

- The integration of a sensing technology within a part requires the part to be massive (composed of juxtaposed beads). Thus, making massive parts in aluminum is the first scientific challenge to resolve. Manufacturing parameters of the WAAM process are listed and explained in the state of the art. Wetting, regularity and mass energy of a bead are identified as indicators of the suitability of the selected parameters to be used to produce sound massive parts. Experimental campaigns are conducted to select parameters not identified by the state of the art to produce a wetted bead with low mass energy. Blocks are made and specimens are extracted then their mechanical characteristics are determined by tensile test in order to validate the selected parameters.
- The second scientific challenge identified is to correctly choose the stress measurement technology to be inserted. Many devices that can be inserted during the WAAM process but also selection methods are reviewed in the bibliographic chapter. A synthesis in four families of strain measurement technologies relevant for the insertion during the WAAM process is therefore proposed. A selection guide based on evaluation criteria, on the knowledge of these technologies and on the specifications of parts to design as smart parts is proposed. Control by induction of an embedded magnetostrictive stress indicator is the most promising technology according to the proposed guide. This technology is used in the rest of the study.
- The third challenge is to make the smart part manufacturable with the selected sensing technology. This technology requires the insertion of a thin steel indicator within the aluminum host part. In order to demonstrate its feasibility, various parameters (indicator's coating, trajectory of the welding torch) are explored during experimental campaigns. Samples produced are analyzed by tomography. Thickness maps of the indicator are thus produced and allow to evaluate their deterioration. Scanning electron microscopy analysis of the intermetallic layer shows the fusion between the indicator and the host part and thus the feasibility of producing a smart part.
- Finally, to realize a smart part with this technology, the last challenge is the choice of the indicator location in the part so that it reports the evolution of the stress in this one. Thus, recommendations for the selection of the mechanical characteristics of the indicator were formulated using the analysis of its magnetostrictive behavior and its mechanical coupling to its environment. Then, a method of placing the indicator for the measurement of the part maximum stress based on finite element simulations is presented for four distinct measurement scenarios.

All the studies carried out allow to conclude on the interest of the use of the WAAM process for the production of smart parts.

Résumé

L'industrie 4.0 a mis en évidence la nécessité de collecter massivement des données et s'appuie donc en partie sur l'usage de pièces intelligentes qui sont capables de fournir des données lors de leur utilisation. De plus, les technologies de fabrication additive métallique semblent être un moyen de réaliser aisément des pièces intelligentes et particulièrement le procédé Wire & Arc Additive Manufacturing (WAAM) qui utilise une technologie de soudure à l'arc. Cela lève la problématique suivante : Comment fabriquer et concevoir une pièce métallique intelligente par fabrication additive WAAM ? Le périmètre de recherche est limité à la mesure de contraintes dans des pièces en alliage d'aluminium. Afin de répondre à cette problématique quatre verrous scientifiques sont identifiées et résolus dans ce manuscrit :

- L'intégration d'une technologie de mesure au sein d'une pièce nécessite que celle-ci soit massive (composée de cordons juxtaposés). Ainsi, réaliser des pièces massives en aluminium est donc le premier verrou à lever. Les paramètres de fabrication du procédé WAAM sont listés et expliqués dans l'état de l'art. Le mouillage, la régularité et l'énergie massique d'un cordon sont identifiés comme des indicateurs de l'aptitude des paramètres sélectionnés à être utilisés pour produire des pièces massives saines. Des campagnes expérimentales sont menées pour sélectionner les paramètres non identifiés par l'état de l'art pour produire un cordon mouillé et ayant une faible énergie massique. Des blocs sont réalisés et des éprouvettes en sont extraites puis leurs caractéristiques mécaniques sont déterminées par essai de traction afin de valider les paramètres retenus.
- Le deuxième verrou scientifique identifié est de choisir correctement la technologie de mesure de contrainte à insérer. De nombreux dispositifs pouvant être insérés au cours du procédé WAAM mais également des méthodes de sélection sont passés en revue dans le chapitre bibliographique. Une synthèse en quatre familles des technologies de mesure de contrainte pertinentes pour l'insertion au cours du procédé WAAM est donc proposée. Un guide de sélection s'appuyant sur des critères d'évaluation, sur la connaissance de ces technologies et sur les spécifications de pièces à rendre intelligente est proposé. Le suivi d'un témoin de contrainte magnétostrictif enfoui par induction est la technologie la plus prometteuse d'après le guide proposé. Cette technologie est utilisée dans la suite de l'étude.
- Le troisième verrou est de rendre fabricable la pièce intelligente avec la technologie de mesure sélectionnée. Cette technologie nécessite l'insertion d'un témoin fin en acier au sein de la pièce hôte en aluminium. Afin d'en démontrer la faisabilité, divers paramètres (revêtement du témoin, trajectoire de la torche de soudure) sont explorés lors de campagnes expérimentales. Les échantillons produits sont analysés par tomographie. Des cartes d'épaisseur des témoins sont ainsi produites et permettent de juger de leur détérioration. L'analyse par microscopie électronique à balayage de la couche intermétallique montre la fusion entre le témoin et la pièce hôte et donc la faisabilité de réaliser une pièce intelligente ainsi.
- Enfin, pour réaliser une pièce intelligente avec cette technologie, le dernier verrou est le choix de l'emplacement du témoin dans la pièce pour que celui-ci rende compte de l'évolution de l'état de contrainte de celle-ci. Ainsi, des préconisations pour la sélection des caractéristiques mécaniques du témoin ont été formulées à l'aide de l'analyse de son comportement magnétostrictif et de son couplage mécanique à son environnement. Puis, une méthode de placement du témoin pour la mesure de la contrainte maximale dans la pièce et basée sur des simulations éléments finis est proposée pour quatre scénarios de mesures distincts.

L'ensemble des études menées permet de conclure sur l'intérêt de l'usage du procédé WAAM pour la production de pièces intelligentes.

Table des sigles et des notations

α : pente entre la contrainte dans le témoin et la contrainte locale lorsque les deux sont dans leur domaine élastique (s.u.)

β : pente entre la contrainte dans le témoin et la contrainte locale lorsque seul l'un des deux a plastifié (s.u.)

γ : Conductivité (S/m)

ϵ : déformation (s.u.)

$\overline{\epsilon}$: déformation moyenne (s.u.)

λ : magnétostriction (s.u.)

λ_b : longueur d'onde de Bragg (nm)

λ_{ratio} : Apport instantané de matière WFS/TS (s.u.)

λ_s : magnétostriction à saturation (s.u.)

μ : perméabilité magnétique (H/m)

$\mu\epsilon$: déformation de l'ordre de 10^{-6} (s.u.)

μ_r : perméabilité magnétique relative (s.u.)

μ_0 : perméabilité magnétique du vide (H/m)

μ_{max} : perméabilité maximale (H/m)

$\overline{\mu}$: perméabilité moyenne (H/m)

ν : Coefficient de Poisson (s.u.)

ρ : masse volumique (kg/m^3)

σ : contrainte (MPa)

$\overline{\sigma}$: Contrainte moyenne (MPa)

σ_e : limite d'élasticité (MPa)

σ_{local}: Contrainte moyenne de l'environnement local autour du témoin (MPa)

$\sigma_{mémoire}$: Seuil de σ_{local} à partir duquel le témoin commence à se plastifier pour les scénarios 3 et 4 (MPa)

σ_r : limite à la rupture (MPa)

$\sigma_{témoin}$: Contrainte moyenne subie par le témoin (MPa)

σ_{VM} : Contrainte Equivalente de Von Mises (MPa)

Φ : Rapport de forme : W/H (s.u.)

χ_m : susceptibilité magnétique (s.u.)

$Ø_{fil}$: Diamètre de fil (mm)

A : allongement à la rupture (s.u.)

a : taux de non-recouvrement (s.u.)

AC/DC : Courant alternatif/ Courant Continu (Alternating Current / Direct Current)

A_{cordon} : Aire du cordon (mm²)

AHP : Analytic Hierarchy Process (Pareil que AMCH)

AMCH : Analyse Multi Critère Hiérarchique (Pareil que AHP)

Angle de mouillage : Angle mesuré au pied du cordon (°)

Ar : Argon

B : Champ Magnétique (T)

BOTDR : Brillouin Optical Time Domain Reflectometry

C : Capacité (F)

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

CDCF : Cahier Des Charges Fonctionnels

CMT : mode Cold Metal Transfer

CMTA : mode CMT Advanced

CMTC : Consortium des Moyens Technologiques Communs

CMTP : mode CMT Pulse

CMTPA : mode CMT Pulse Advanced

CND : Contrôle Non Destructif

Corr H Arc : Correction de Hauteur d'Arc (%)

CTWD : Distance entre le tube contact et la surface de dépose (Contact-Tip-to-Work Distance)

d : écart-vecteur ou center distance, distance entre deux cordons juxtaposé ; d=aw (mm)

DAS : Dendrite Arm Spacing

EBM : Electron Beam Melting

E : Module de Young (GPa)

EDS : Spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)

E_l : Energie linéique : P/TS (J/mm)

E_m : Energie massique (J/g)

EMA : Electro-Magnéto-Acoustique (génération d'onde vibratoire par force de Lorentz ou par magnetostriction grâce à une bobine)

EP/EN : Rapport de polarité de la soudure (Electrode Positive/Electrode Négative)

E_T : pente $\sigma - \epsilon$ sur un modèle bilinéaire dans le domaine plastique (MPa)

F : Force (N)

FAIR : Fabrication Additive Intelligente et Rapide

FBG : Fibre à réseau de Bragg (Fiber Bragg Grating)

FDM : Fused Deposition Modeling

FMC : Full Matrix Capture

FOM : Flat-top Overlapping Model

GMAW : Gas Metal Arc Welding (MIG/MAG)

GSCOP : laboratoire de Grenoble des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production

GTAW : Gas Tungsten Arc Welding (TIG)

H : Induction Magnétique (A/m)

H ou h: Hauteur (mm)

HI : Heat Input ; équivalent à l'énergie linéique (J/mm)

H_s : Induction à saturation (A/m)

Humping : Défaut de régularité d'un cordon (connue également sous le nom de Bowling)

I : Intensité du courant de soudure (A)

Idle Time : Temps d'attente entre deux soudures consécutives (s)

Interpass T° : Température à laquelle se trouve une surface sur laquelle un cordon est déposé (°C)

L : Inductance (H)

M : Aimantation (A/m)

MAG : Metal Active Gas

MEB : Microscope Electronique à Balayage

MEF : Méthode Eléments Finis

MIG : Metal Inert Gas

NDT : Non Destructive Testing (idem CND)

Offset : Distance TCP (bout de fil) – Témoin (mm)

OTDR : Optical Time Domain Reflectometry

P : Puissance (W)

PAUT : Phased Array Ultrasonic Testing

PAW : Plasma Arc Welding

PBF : Powder Bed Fusion

R : Résistance (Ω)

ROTDR : Rayleigh Optical Time Domain Reflectometry

SAFT : Synthetic Aperture Focusing Technique

SIMAP : laboratoire des Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés

SLA : Stéréolithographie

Slicing : tranchage en couche d'un modèle numérique d'une pièce à produire par fabrication additive

SLM : Selective Laser Melting

SLS : Selective Laser Sintering

Strictif : se dit d'une propriété d'un matériau qui est modifié par sa déformation

T°: Température (°C)

TCP : Point en bout de torche dont le mouvement est contrôlé par le robot (bout du fil) (Tool Center Point)

TFM : Total Focusing Method

TIG : Tungsten Inert Gas

TIMA : laboratoire des Techniques de l'Informatique et de la Microélectronique pour l'Architecture des systèmes intégrés

ToFD : Time of Flight Diffraction

TOM : Tangent Overlapping Model

Travel Angle : Angle de torche dans le plan d'avance de la torche et perpendiculaire au substrat (°)

TRL : Technology Readiness Level (Niveau de maturité technologique)

TS : Travel Speed ou Torch Speed, Vitesse de déplacement de la torche (m/min)

U : Tension de l'arc de soudure (V)

UGA : Université Grenoble Alpes

ULC : Ultra Low Carbon

UT : Ultrasonic Testing

Voxel : pixel volumique (en 3D)

W ou w : Largeur (mm)

WAAM : Fabrication additive arc-fil (Wire & Arc Additive Manufacturing)

WFS : Wire Feed Speed, Vitesse de dévidage de fil moyenne (m/min)

Work Angle : Angle de torche dans le plan perpendiculaire au substrat et au plan d'avance de la torche (°)

WPM : Méthode par Produit pondéré (Weight Product Method)

WSM : Méthode par Somme pondérée (Weight Sum Method)

Z : Impédance (Ω)

Table des matières

Remerciements III
English Summary V
Résumé VII
Table des sigles et des notations IX
Table des matières XIII
Introduction : Périmètre et verrous scientifiques 1
Chapitre I : Bibliographie 4
I.1. Fabriquer une pièce massive en WAAM 4
I.1.1. Le procédé WAAM 4
I.1.2. Critères d'évaluation 7
I.1.3. Classification des paramètres influents 12
I.1.4. Etat de l'art des paramètres listés 13
I.1.5. Synthèse 25
I.1.6. Etat de l'art des méthodes de détermination des paramètres 26
I.2. Sélectionner un capteur de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM 28
I.2.1. Définitions et détermination de catégories de capteurs pour leur insertion 28
I.2.2. Classification des capteurs 30
I.2.3. Méthodes de sélection de capteur 35
I.3. Rendre fabricable la pièce intelligente avec la technologie de mesure sélectionnée 38
I.3.1. Etat de l'art sur l'enfouissement d'inserts dans un procédé de fabrication additive 38
I.3.2. Etat de l'art de la soudure aluminium-acier 41
I.3.3. Etat de l'art soudure fin-épais 43
I.3.4. L'analyse par tomographie d'une liaison acier / aluminium 44
I.3.5. L'analyse au MEB et à la sonde EDS de la couche intermétallique 44
I.3.6. Conclusion 45
I.4. Concevoir la pièce intelligente avec la technologie de mesure sélectionnée 46
I.4.1. Magnétostriction et chargement 46
I.4.2. Simulation éléments finis statique sur pièce bi-matériaux 47
I.4.3. Conclusion 50
I.5. Conclusion de la bibliographie 51
Chapitre II : Détermination des paramètres de fabrication pour la réalisation d'une pièce massive .. 53
II.1. Campagnes expérimentales pour la sélection des paramètres restants 53
II.1.1. Campagnes expérimentales pour le choix des paramètres (WFS-TS-EP/EN) 53

II.1.2. Température « d'interpass » pour les couches supérieures 57
II.1.3. Proposition de stratégie de fabrication 58
II.1.4. Synthèse 59
II.2. Validation expérimentale des paramètres sélectionnés 59
II.2.1. Démarche expérimentale et fabrication 59
II.2.2. Essais de traction 61
II.2.3. Conclusion 63
II.3. Conclusion et perspectives 64
Chapitre III : Sélection de capteurs de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM 66
III.1. Contexte et périmètre 66
III.2. Guide et critères de sélection 67
III.2.1. Choix de l'outil de sélection 67
III.2.2. Critères de sélection 68
III.3. Présentation et évaluation de capteurs de chaque famille 69
III.3.1. Capteurs complètement enfouis 69
III.3.2. Capteurs nécessitant un guide d'onde 72
III.3.3. Transducteurs mesurant une dimension 75
III.3.4. Transducteurs mesurant une propriété intrinsèque strictive 78
III.3.5. Conclusion 82
III.4. Mise à l'épreuve du guide de sélection 82
III.4.1. Pièce exemple 1 : Longeron d'aile d'avion 83
III.4.2. Pièce exemple 2 : Crochet de levage pour pièce légère 84
III.4.3. Calcul du résultat pour chaque pièce et sélection de la technologie la plus adaptée 84
III.5. Technologie retenue pour la suite de l'étude 85
III.6. Conclusion et perspectives 87
Chapitre IV : Fabricabilité d'une pièce en aluminium contenant un témoin en acier 90
IV.1. Périmètre de recherche 90
IV.2. Validation du revêtement du témoin 92
IV.2.1. Objectif 92
IV.2.2. Configuration 92
IV.2.3. Observations et résultats 92
IV.2.4. Conclusion 93
IV.3. Validation de la stratégie d'enfouissement 93
IV.3.1. Stratégie d'enfouissement 93
IV.3.2. Conclusion intermédiaire 95
IV.3.3. Expérimentation sur l'influence de l'offset 95

IV.3.4. Analyse de la détérioration et du mouillage du témoin par tomographie 96
IV.3.5. Analyse de l'interface aluminium-acier 99
IV.3.6. Conclusion expériences et analyse 100
IV.4. Conclusion et perspectives 101
Chapitre V : Sélection et positionnement du témoin de contrainte dans une pièce 103
V.1. Objectifs 103
V.1.1. Périmètre et scénario de mesure 103
V.1.2. Chaine de mesure 105
V.2. Etude de la chaine de mesure 106
V.2.1. Caractère magnétostrictif inverse du témoin 106
V.2.2. Couplage mécanique entre le témoin et son environnement 108
V.2.3. Conclusion de l'étude de la chaîne de mesure 115
V.3. Méthode de placement et détermination de la contrainte maximale 115
V.3.1. Modèle d'illustration : Poutre encastrée libre en flexion 115
V.3.2. Méthode 116
V.3.3. Procédure de lecture de la grandeur recherchée à partir de la contrainte témoin 119
V.3.4. Validation de la méthode proposée 120
V.3.5. Conclusion sur la méthode de placement 124
V.4. Cas d'étude 125
V.4.1. Présentation du cas d'étude et de ces enjeux 125
V.4.2. Application de la méthode 126
V.4.3. Lecture 128
V.4.4. Conclusion du cas d'étude 128
V.5. Discussions 128
V.6. Conclusion et Perspectives 129
Conclusions de la thèse 132
Perspectives de la thèse 133
Annexes 136
Références 138
Table des Figures 150
Table des Tables 156

Introduction : Périmètre et verrous scientifiques

La fabrication additive arc-fil connue sous la désignation WAAM (Wire & Arc Additive Manufacturing) est l'application des technologies de soudure à l'arc à des fins de fabrication additive. Des cordons de soudures sont juxtaposés et empilés pour former des pièces métalliques.

Les alliages d'aluminium sont des matériaux pertinents et adaptés au procédé WAAM. Ils permettent d'obtenir des pièces légères et résistantes. Ils présentent également une bonne résistance à la corrosion ce qui est intéressant pour créer des pièces ou recouvrir des pièces (application connue sous le nom de « cladding » ou « coating ») qui fonctionnent en milieu hostile. Le WAAM permet de fabriquer rapidement et avec des coûts réduits des pièces grandes et complexes (Williams et al., 2016). Ce procédé est plus performant par rapport aux autres procédés de fabrication additive métallique dans les enjeux de réduction des coûts et délais de fabrication. Le procédé WAAM est donc adapté pour les secteurs automobile et aéronautique (Rodrigues et al., 2019) qui ont besoin de fabriquer rapidement de grandes pièces à haute valeur ajoutée dans des alliages solides et légers tel que les alliages d'aluminium.

Afin de préserver ces pièces stratégiques à haute valeur ajoutée au cours de leur utilisation, il est nécessaire de contrôler leur état et leur environnement. Une solution commune pour répondre à ce problème est d'instrumenter la pièce réalisée avec des capteurs embarqués. Une nouvelle solution est apportée par l'industrie 4.0, celle des pièces intelligentes.

Une pièce intelligente renvoie des données à l'utilisateur sur son état ou sur son environnement et peut réagir en fonction de celui-ci. Contrairement à une pièce instrumentée, elle est conçue et fabriquée dans le but de réagir de manière autonome à son environnement ou de renvoyer des données sur son interaction avec celui-ci. Ce caractère est intrinsèque à la pièce et provient de la manière dont celle-ci est conçue et non d'une agrégation d'éléments (Meyer et al., 2009).

Il existe deux manières de réaliser une pièce intelligente : par l'utilisation d'un matériau intelligent (qui réagit à un stimuli extérieur) ou par l'insertion d'un dispositif – capteur ou actionneur (qui communique et/ou réagit à un stimuli extérieur). L'insertion d'un dispositif à l'intérieur d'une pièce permet de le protéger de l'environnement extérieur à la pièce et ainsi d'utiliser des pièces intelligentes dans des milieux hostiles.

Le concept de pièces ou de matériaux « nervés » d'actionneurs et de capteurs reliés en réseaux tels les nerfs et les fibres dans un muscle est mentionné par (Saheb and Mekid, 2015).Les technologies de fabrication additive sont particulièrement indiquées pour la création de ce type de pièce (Lehmhus et al., 2016). En effet la matière de la pièce est ajoutée couche par couche, il est donc aisé de concevoir la pièce autour d'un insert. La technologie WAAM est également pertinente pour ce type de pièces car elle permet un accès facilité à la zone de travail.

Le projet FAIR a pour objectif d'évaluer la capacité de la technologie WAAM à produire des pièces métalliques intelligentes par insertion de dispositifs au cours du procédé de fabrication. Ce projet est financé par la région Auvergne Rhône-Alpes. Le pôle de compétitivité CIMES est partie prenante dans ce projet qui est soutenu par les entreprises Caterpillar et ART. Les laboratoires TIMA et G-SCOP sont associés dans ce projet pour développer respectivement la technologie de mesure associée à la pièce intelligente et la méthode de conception de celle-ci.

Les pièces complexes produites en alliage d'aluminium sont pertinentes pour la technologie WAAM et celle-ci est indiquée pour la production de pièces intelligentes. Un alliage d'aluminium est

donc choisi comme matériau principal d'application du projet. Les pièces en alliage d'aluminium sont cependant plus enclines à se déformer que celles réalisées en acier, il apparait donc important de palier ce point faible en monitorant leur déformation ou leur contrainte. Afin d'être capable de mesurer cette information au sein même de la pièce, le capteur doit pouvoir être inséré au cœur de la pièce.

La thèse entreprise s'emploie à répondre à la problématique suivante :

Comment concevoir et fabriquer des pièces métalliques intelligentes avec le procédé WAAM ?

Pour cela, quatre verrous scientifiques ont été identifiés :

Verrou 1 : Fabriquer une pièce massive en WAAM

Afin de réaliser des pièces intelligentes avec cette technologie, il est nécessaire de pouvoir recouvrir le dispositif permettant de rendre la pièce en construction intelligente. La taille des cordons en WAAM étant de l'ordre de quelques millimètres, et le dispositif à insérer ayant à priori une taille de l'ordre de la dizaine de millimètres, il semble nécessaire de juxtaposer des cordons les uns à côtés des autres pour aboutir à ce recouvrement. **Le premier verrou scientifique à lever est donc de savoir produire en un temps raisonnable une pièce massive c'est-à-dire une pièce dont les couches sont formées de plusieurs cordons juxtaposés avec la technologie WAAM**.

Le Chapitre II décrit les expériences nécessaires pour fixer les paramètres de soudage qui n'ont pas pu l'être par l'état de l'art. Avec ces paramètres, des pièces massives de type bloc sont réalisées et leurs propriétés mécaniques sont analysées.

Verrou 2 : Sélectionner un capteur de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM

Plusieurs technologies permettant de mesurer l'état de contrainte dans une pièce existent. Elles ne sont cependant pas toutes indiquées pour être insérées dans une pièce fabriquée par la technologie WAAM. Outre les contraintes imposées par la technologie WAAM, les spécifications de la pièce à réaliser influencent également le choix de la technologie à enfouir. **Le second verrou est de sélectionner la technologie de mesure la plus pertinente à enfouir en fonction de la pièce à réaliser.**

La résolution des verrous 1 et 2 permet de réaliser un choix de technologie pour la suite de l'étude. Ainsi, la technologie de mesure sélectionnée s'appuie sur le contrôle par induction d'un témoin magnétostrictif fin enfoui dans une pièce.

Verrou 3 : Rendre fabricable la pièce intelligente avec la technologie sélectionnée

Le choix de technologie implique d'enfouir un témoin fin en acier dans une pièce massive en aluminium avec le procédé WAAM. Souder ensemble deux matériaux distincts peut s'avérer être une tâche complexe. De plus, la différence d'épaisseur entre la pièce et le témoin ajoute un degré de difficulté à l'insertion saine de celui-ci au cours du procédé WAAM. **Le troisième verrou est donc de réussir à enfouir ce témoin dans une pièce hôte fabriquée avec la technologie WAAM.**

Verrou 4 : Concevoir la pièce intelligente avec la technologie sélectionnée

Le témoin à insérer doit rendre compte de l'évolution de l'état de contrainte dans la pièce. Pour cela, ses caractéristiques mécaniques et sa position doivent être choisies de façon à ne pas dégrader la pièce hôte et à ce qu'il traduise fidèlement la grandeur à mesurer. **Le dernier verrou est donc de sélectionner et positionner le témoin dans la pièce vis-à-vis des sollicitations à contrôler.**

L'étude bibliographique de ces verrous permet de préciser les questions de recherche restantes. Celle-ci est maintenant présentée.

Chapitre I : Bibliographie

Ce chapitre présente l'état de l'art sur chacun des verrous énoncés précédemment. Le premier verrou énoncé est la fabrication de pièces massives. La sélection d'un capteur de contraintes adapté à l'enfouissement au cours du procédé WAAM est le deuxième verrou énoncé. Il est ensuite nécessaire de rendre fabricable par procédé WAAM la pièce intelligente avec la technologie sélectionnée, il s'agit du troisième verrou à lever. Enfin, le dernier verrou est de concevoir la pièce intelligente avec cette technologie afin qu'elle rende bien compte de l'état de contrainte dans la pièce.

I.1. Fabriquer une pièce massive en WAAM

Cette section présente l'état de l'art sur la technologie WAAM, ses paramètres, et la fabrication de pièces massives avec cette technologie.

Pour réaliser une pièce massive avec la technologie WAAM, il est nécessaire dans un premier temps de connaître ce procédé. Ce procédé est utilisé au cours de cette thèse pour produire des pièces massives en aluminium. Il est donc présenté par la suite les critères permettant de juger un cordon, une couche et un empilement de couches avec le procédé WAAM et ainsi de sélectionner les paramètres pertinents pour réaliser une pièce massive correcte en aluminium dans un temps convenable. Ces paramètres sont listés et classifiés. Une revue de l'état de l'art est réalisée et permet de fixer un grand nombre des paramètres pour produire une pièce massive en aluminium. Une synthèse de l'ensemble des paramètres fixés par l'état de l'art et ceux restant à fixer par des campagnes expérimentales est finalement présentée.

I.1.1. Le procédé WAAM

Le procédé WAAM est l'utilisation de la soudure à l'arc à des fins de fabrication additive. Ainsi, une cellule de fabrication WAAM associe un actionneur (un robot ou une commande numérique), un poste de soudure à l'arc et une table de soudure (fixe ou mobile). Le poste de soudure est composé d'une torche de soudure, d'un générateur, d'un dévidoir et d'une bouteille de gaz (Figure 1). Le générateur permet de créer un arc électrique entre la torche de soudure, qui est manipulée par l'actionneur, et le substrat métallique qui est positionné sur la table de soudure. Le dévidoir amène le fil d'apport en bout de torche et l'arc électrique le fait fondre pour créer un cordon de soudure sur le substrat. Le gaz amené en bout de torche permet de créer une atmosphère protectrice locale qui permet de stabiliser l'arc de soudure et d'empêcher le bain de fusion de s'oxyder. Le mouvement de la torche imposé par l'actionneur permet de créer des cordons de soudures suivant une trajectoire donnée, de les juxtaposer, de les empiler et ainsi de produire des pièces de manière additive.

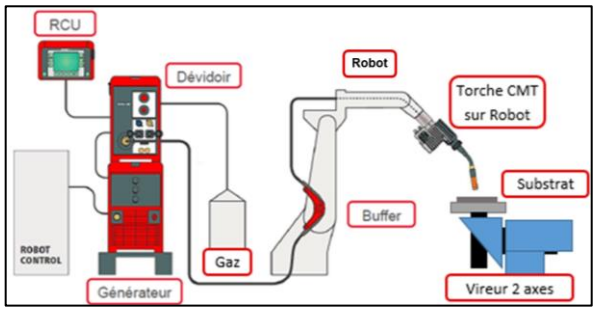


Figure 1 Exemple de cellule robotisée WAAM (FRONIUS France, 2017a)

La cellule WAAM qui est utilisée au cours de cette thèse se situe sur la plateforme GINOVA de S.mart Dauphiné Savoie (Figure 2). Cette cellule est composée d'un poste de soudure TPS CMT 4000

Advanced, d'un robot Yaskawa 6 axes MA1440 associé à un contrôleur DX200, d'un vireur 2 axes MT250 S2D et d'un plateau chauffant à résistance céramique contrôlé par un thermocouple K et un régulateur PID. Il existe plusieurs technologies de soudure à l'arc pouvant être utilisées pour des applications WAAM (MIG, TIG, Plasma …). La technologie de soudure Cold Metal Transfer © (CMT) accessible depuis le poste de soudure disponible est utilisée pour toutes les applications WAAM réalisées au cours de cette thèse.

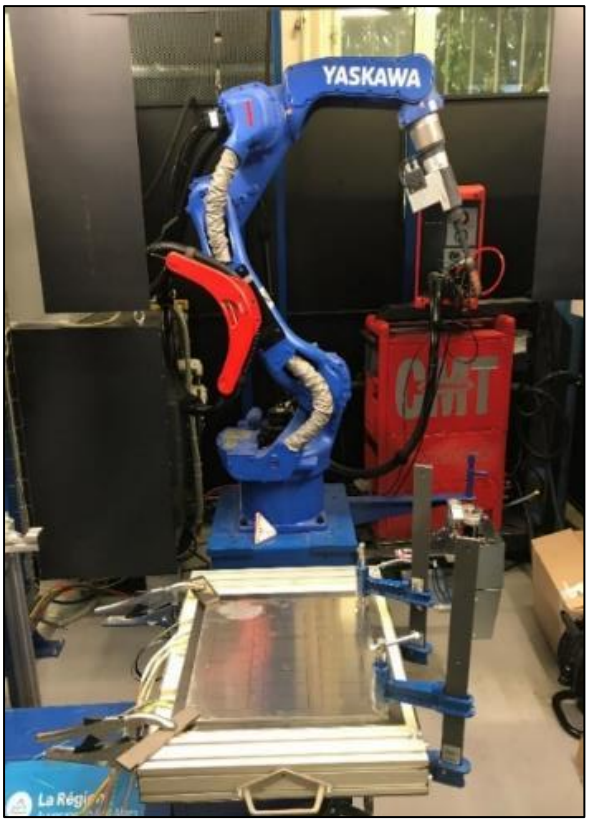


Figure 2: Installation WAAM-CMT avec plateau chauffant présente sur la plateforme GINOVA de S.mart Dauphiné Savoie

La technologie de soudure CMT développée par Fronius GmbH © est une technologie dérivée de la soudure MIG (ou GMAW). La soudure MIG (Metal Inert Gas) se définie par le fait que le fil d'apport est amené co-axialement à la torche (Figure 3) et sert d'électrode pour la création de l'arc de soudure. L'arc est ainsi créé entre le fil d'apport et le substrat et permet de faire fondre le fil d'apport pour créer le cordon de soudure.

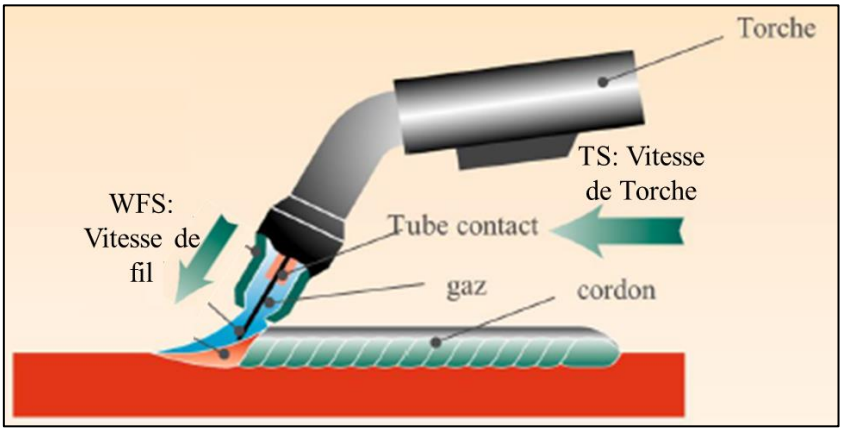


Figure 3: Schéma de principe de soudure MIG (FRONIUS France, 2017b)

La technologie CMT a été inventée en 2004 et est une technologie de soudure dite « froide ». La particularité de cette technologie est qu'un mouvement d'avance et de recul est imposé au fil d'apport à une fréquence d'environ 100Hz par un galet présent dans la torche. Ce mouvement permet d'alterner des phases de court-circuit, où le fil est en contact avec le substrat avec des phases d'arc, où l'arc électrique est créé par le non contact entre le fil sous tension et le substrat (Figure 4). Ainsi, moins d'énergie est apportée à l'arc de soudure et le transfert de matière est facilité. Les cordons de soudure obtenus sont ainsi réalisés avec moins d'énergie qu'une soudure MIG classique.

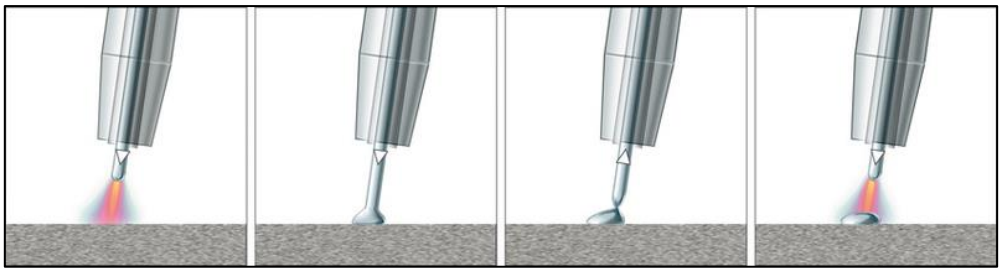


Figure 4: Décomposition du mouvement du fil permettant le transfert de matière du mode CMT (Wesling et al., 2010)

Quatre variations ou modes autour de cette technologie peuvent être utilisées à partir du poste de soudure TPS 4000 CMT Advanced à disposition.

Le mode CMT originel a déjà été présenté. Il se distingue de la soudure MIG par une phase d'arc et une phase de court-circuit provenant du mouvement imposé au fil. La phase d'arc est elle-même divisée en deux : une phase d'arc chaud ou l'intensité de l'arc est plus importante et une phase d'arc froid ou l'intensité est moins importante. La Figure 5 présente ainsi l'intensité de l'arc, la tension de l'arc et la vitesse du fil au cours du temps pendant un cycle d'avance et de recul du fil.

Le mode CMT Pulse (CMTP) alterne des phases de soudure CMT déjà présentées avec des phases de soudure pulsée. Lors des phases de soudure pulsée le mouvement d'avance et de recul du fil est interrompu et des impulsions d'intensité viennent détacher des gouttes de métal fondues du fil. La Figure 6 présente le détail de ce mode.

Le mode CMT Advanced (CMTA) alterne la polarité de l'arc sur des phases de soudure CMT (Figure 7). Ainsi des cycles d'avance et de recul du fil où le fil est usuellement bombardé par des électrons provenant du substrat s'enchainent avec des cycles où le fil projette des électrons sur le substrat.

Le mode CMT Pulse Advanced (CMTPA) alterne des phases d'avance et de recul du fil où la polarité est inversée avec des phases de soudure pulsée sans mouvement particulier du fil et où le fil redevient l'électrode positive (Figure 8).

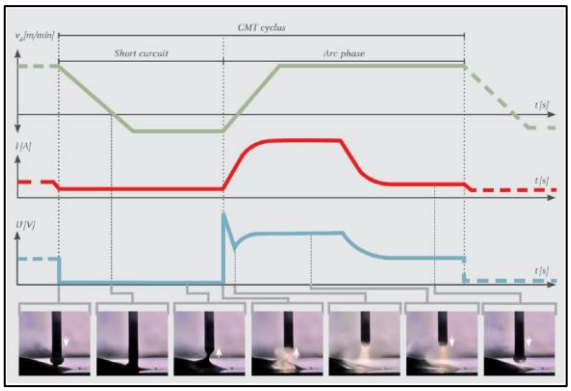


Figure 5: Description du mode CMT (FRONIUS France, 2017a)

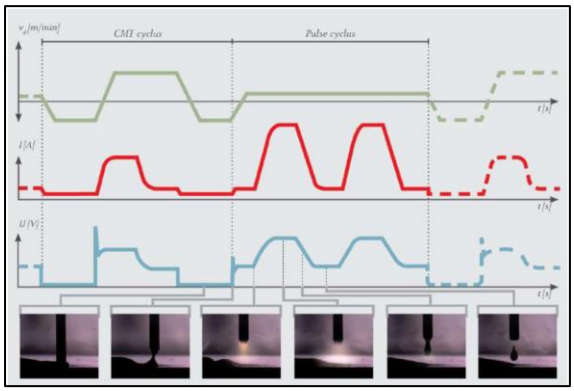


Figure 6: Description du mode CMTP (FRONIUS France, 2017a)

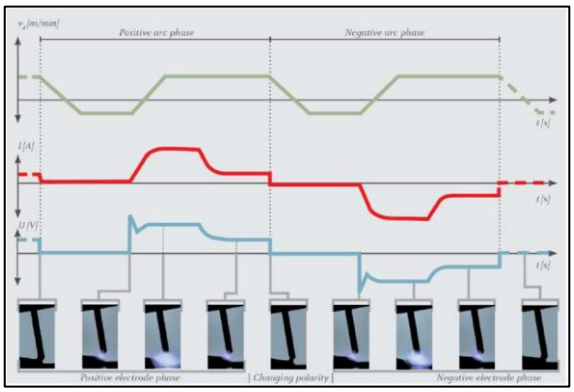


Figure 7: Description du mode CMTA (FRONIUS France, 2017a)

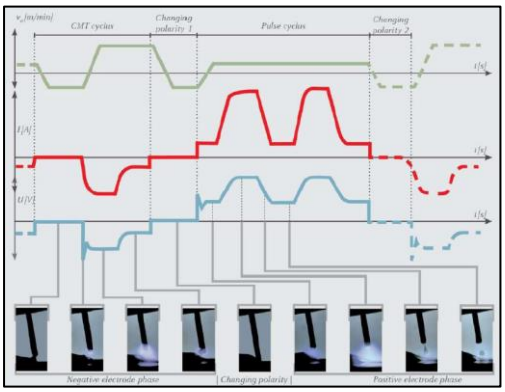


Figure 8: Description du mode CMTPA (FRONIUS France, 2017a)

Le procédé WAAM et la technologie de soudure CMT qui lui est associée ont été présentés. L'objectif du WAAM est de produire une pièce de manière additive. Afin de sélectionner les paramètres permettant de produire une pièce de qualité, il est important de définir les critères permettant de juger les cordons, les couches et les empilements produits.

I.1.2. Critères d'évaluation

Afin de pouvoir juger de la qualité d'une pièce massive en aluminium produite par le procédé WAAM, des critères d'évaluation sont présentés. Ces critères permettent de juger de la qualité d'un cordon, d'une couche formée par juxtaposition de cordons ou d'une pièce réalisée par empilement de couches.

I.1.2.1. Critères d'évaluation des cordons

a) Mouillage

Le premier critère d'évaluation est celui du mouillage du cordon, c'est-à-dire son étalement. Ce critère est déterminant pour la réalisation de pièces massives par juxtaposition. L'angle de mouillage est l'angle formé au pied du cordon entre le cordon et le substrat. C'est un critère important et souligné par (Pickin et al., 2011) pour les applications de « cladding ». Deux cordons ayant un angle de mouillage insuffisant ne peuvent être juxtaposés sans créer de vide (Figure 9). Il est donc nécessaire de produire un cordon ayant un angle de mouillage au-delà des 90°.

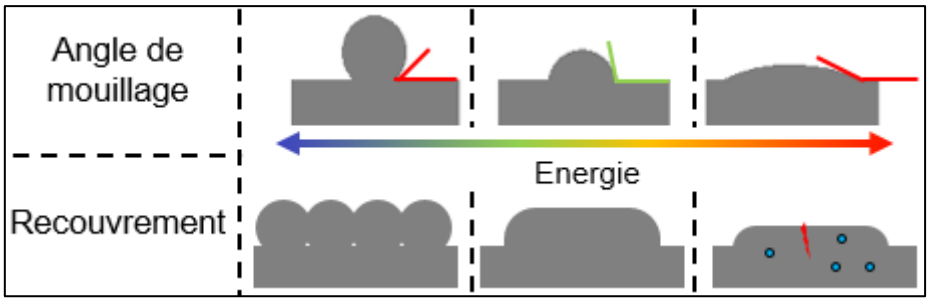


Figure 9: Influence de l'énergie de soudure sur le mouillage du cordon et le recouvrement de cordons

Lorsque l'angle de mouillage est difficilement mesurable, le rapport $\Phi =$ Largeur /Hauteur (W/H) est également un bon indicateur pour évaluer le mouillage. En approximant le profil du cordon de soudure par un arc de cercle, un angle de mouillage supérieur à 90° correspond à un rapport Φ supérieur à 2 (Figure 10). Le rapport Φ est utilisé pour évaluer les cordons dans la suite de l'étude.

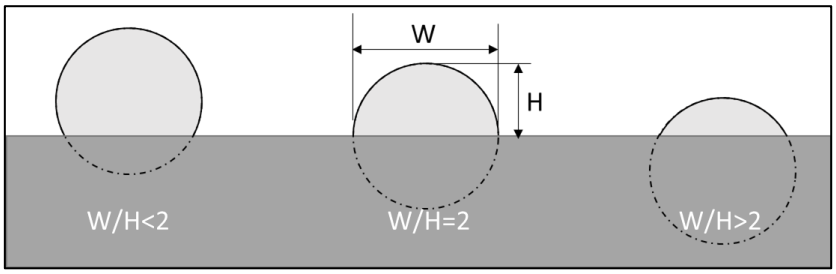


Figure 10: Mouillage du cordon pour différente valeur de Φ= W/H

b) Régularité

Le second critère est celui de la régularité dimensionnelle du cordon. Ce critère est déterminant pour s'assurer de la stabilité de la juxtaposition et de l'empilement des cordons. En effet, un cordon ayant une largeur ou une hauteur trop variable ne peut recouvrir ou être recouvert efficacement par un cordon. Un cordon de soudure peut être divisé en trois partie : son début, son corps, et sa fin. Le corps du cordon a les dimensions nominales imposées par les paramètres de soudures. Le début et la fin du cordon présentent respectivement une bosse et un creux dus au caractère transitoire des paramètres de soudage lors de leur réalisation (Figure 11). Ces irrégularités sont inhérentes à un cordon de soudure. Elles peuvent être minimisées ou écartées dans une zone non critique ou une zone de surépaisseur usinable a postériori. Il est en revanche important que le cordon soit régulier sur toute la longueur de son corps.

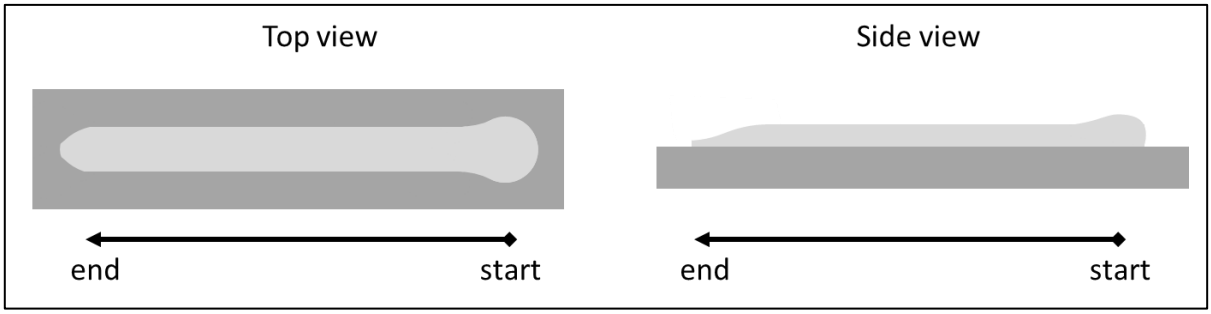


Figure 11: Vue de haut et de côté d'un cordon de soudure

La Figure 12 illustre deux types de cordons dont le corps est irrégulier, le premier dû à une surchauffe conduisant à un effondrement progressif du cordon, le second caractérisé par le défaut de « humping » où l'énergie de soudure n'est pas assez importante par rapport à la vitesse de déplacement de torche et où le cordon se refroidit trop rapidement.

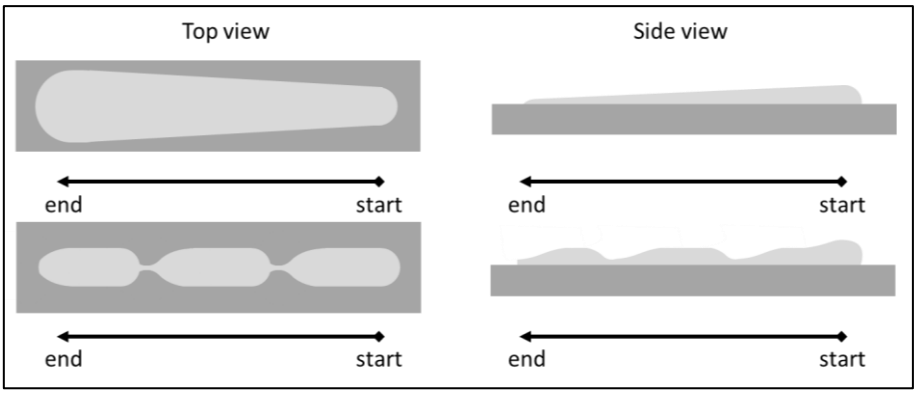


Figure 12: Vue de haut et de côté de cordons de soudures irréguliers : (en haut) trop énergétique (en bas) pas assez énergétique « humping »

c) Gestion de l'énergie apportée

De nombreux défauts liés aux pièces WAAM aluminium peuvent être résolus avec une gestion efficace de l'énergie apportée (Wu et al., 2018). En effet, un juste apport d'énergie permet l'amélioration de la vitesse de production et de la qualité matière. En outre, produire une pièce de qualité en un temps raisonnable demande une gestion efficace de l'énergie apportée et des temps de refroidissement entre deux soudures consécutives qui peuvent être nécessaires (Béraud et al., 2022).

Un défaut très important dans les pièces WAAM, en particulier en aluminium, est leur taux de porosités. Un haut taux de porosités donne lieu à des caractéristiques mécaniques amoindries. L'origine des porosités en aluminium est double ; elles proviennent :

- Soit de la diminution de volume provenant du refroidissement de l'aluminium et de son haut taux de dilatation (créant par refroidissement et rétractation des pores vides dans la matière);
- Soit de l'emprisonnement d'hydrogène dans la piscine de fusion dû au fort taux de dilution de l'hydrogène dans l'aluminium liquide.

Ce dernier mécanisme est la cause principale des porosités en WAAM. L'hydrogène qui est la cause de ce type de porosités peut venir de plusieurs sources.

Il peut être présent dans les composés organiques et dans l'humidité piégée à la surface et dans les défauts du fil d'apport ou du substrat. L'hydrogène se mélange alors à l'aluminium liquide lors de la fusion du fil par l'arc électrique. L'hydrogène présent dans le fil d'apport est selon (Ryan et al., 2018) et (Devletian and Wood, 1983) la principale cause de porosités dans les fabrications WAAM et les soudures aluminium.

L'hydrogène peut également provenir de l'atmosphère ou du gaz protecteur et se mélanger au bain de fusion lorsque la surface de celui-ci est perturbée. La couche protectrice d'oxyde se formant naturellement à la surface de celle-ci est alors brisée et l'hydrogène présent dans l'air ou dans le gaz peut alors se dissoudre dans le bain d'aluminium liquide. Ainsi la pureté du gaz protecteur est un facteur important, il ne faut pas que de l'humidité puisse s'être mélangée à celui-ci.

En outre, la formation d'alumine, l'oxyde qui se créée en surface de l'aluminium lorsque celui-ci se trouve à température ambiante est une autre source d'hydrogène. Lors de la création de cet oxyde, l'aluminium réagit avec l'humidité présente dans l'air et du dihydrogène se forme : $2Al + 3H_20 => Al_2O_3 + 3H_2$. Il diffuse alors à travers la surface formée par l'oxyde pour se mélanger à l'aluminium.

L'hydrogène a une haute solubilité dans l'aluminium liquide et se mélange à celui-ci dans le bain de fusion. La quantité d'hydrogène qui se mélange au bain de soudure liquide dépend notamment du volume du bain de fusion et de la température du bain de fusion. En effet, la solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium augmente avec la température de l'aluminium.

De plus la solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium est plus importante en phase liquide qu'en phase solide. Cela conduit lors du refroidissement à ce que les atomes d'hydrogènes soient repoussés dans le bain de fusion liquide par le front de solidification. Les atomes peuvent ainsi se regrouper et former des molécules. La concentration en hydrogène dans l'aluminium liquide augmente, jusqu'à arriver à saturation. Cependant l'aluminium peut être sursaturé en hydrogène si la pression dans le bain de fusion liquide n'a pas dépassé le seuil nécessaire pour créer une porosité. Lorsque la sursaturation de l'hydrogène dans le bain de fusion et l'augmentation de la pression dans celui-ci due à l'avancement du front de solidification dépassent le seuil requis cela conduit à la formation de porosités par le regroupement de molécules d'hydrogène et la création d'une nouvelle surface (Legait, 2006). Les porosités se forment autour d'inclusions et au pied des dendrites.

Les porosités peuvent grossir et se regrouper par coalescence lorsque la température est élevée et le taux de refroidissement faible. Lorsque le refroidissement, est rapide les pores se créent plus difficilement car l'espacement dendritique (DAS) est plus faible et l'aluminium se sursature plus facilement en hydrogène (Legait, 2006).

La formation d'oxyde est un autre défaut de la soudure aluminium. Les oxydes qui sont créées et qui se mélangent au bain de fusion forment des inclusions dans la pièce aluminium. Ces oxydes affaiblissent les propriétés mécaniques de la pièce produite et sont des sites de nucléation de porosités dans le bain de soudure.

Les déformations du substrat induites par les contraintes résiduelles générées par le procédé sont un défaut important et récurrent en WAAM aluminium. Des fissures apparaissent lorsque les contraintes résiduelles sont supérieures à la limite à la rupture du matériau. Lorsqu'elles sont inférieures cela induit des déformations dans la pièce réalisée. Les contraintes résiduelles sont générées lorsqu'un matériau subit de forts gradients thermiques. Des déformations sont créées par la différence de dilatations et de contraction de volumes en contact ayant des températures différentes.

Enfin une énergie de soudure importante tend à produire une microstructure formée de larges grains colonnaires induisant de faibles propriétés mécaniques alors qu'une énergie de soudure maîtrisée permet de produire une microstructure formée de grains équi-axes plus fins et de ce fait, de meilleures propriétés mécaniques (Gierth et al., 2020), (Su et al., 2019).

L'énergie linéique renseigne le nombre de joules apportés pour chaque millimètre parcouru par la torche. Cet indicateur de qualité provient de la soudure et est utilisé notamment dans des documents normatifs (AFNOR, 2002; Michel, 2016). Minimiser l'énergie linéique conduit à minimiser la puissance (P) et à maximiser la vitesse de déplacement de torche (TS). Une conséquence néfaste de cet indicateur est que puisque la vitesse de dévidage de fil (WFS) est liée à la puissance, cela amène à choisir les cordons qui ont la plus faible section, c'est-à-dire, le plus petit apport de matière $\lambda = \frac{WFS}{TS}$, ce qui n'est pas souhaitable.

Il est majoritaire dans la littérature (Cong et al., 2016) ; (Li et al., 2020) ; (Derekar, 2018) de s'appuyer sur l'énergie linéique (P/TS) pour évaluer la santé matière des cordons. (Cong et al., 2016) ont montré que l'énergie linéique a un impact direct sur le taux de porosités de la soudure réalisée. Les déformations peuvent être prévenues en minimisant l'énergie linéique apportée lors de la soudure en réduisant le gradient thermique généré (Koli et al., 2020).

Comme vu précédemment, minimiser les températures et l'énergie apportée à chaque gramme de matière déposé, et non à chaque millimètre parcouru par la torche, permet d'améliorer, la qualité du cordon. L'énergie massique E_m renseigne le nombre de joules apportés pour chaque gramme de fil fondu est le critère retenu pour la suite de l'étude. Celle-ci peut être calculée par l'équation suivante : $E_m = (P/WFS) * (1/(\pi \frac{\emptyset_{fil}^2}{4} \rho))$

Les critères spécifiés évaluent donc la santé matière, la qualité géométrique et l'efficacité du cordon.

I.1.2.2. Critères d'évaluation des couches

Pour choisir les paramètres idéaux pour former une couche, il est nécessaire de définir des critères d'évaluation.

Le premier critère est la planéité de la surface supérieure de la couche réalisée. Une couche non-plane peut indiquer des manques de recouvrement locaux, des phénomènes de surchauffe ou une distance entre deux cordons juxtaposés non optimale (Figure 13). L'empilement de couches non planes entraîne une accumulation des défauts générés qui peut venir mettre en danger la réalisation finale de la pièce (Figure 14).

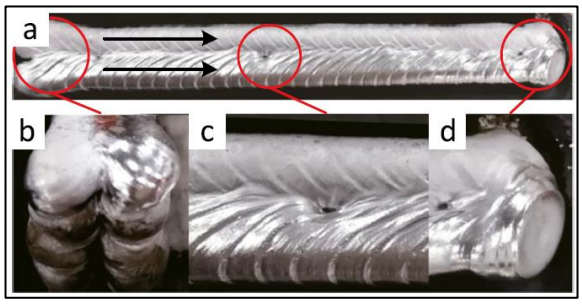


Figure 13: Manque de recouvrement sur 2 cordons juxtaposés (Ma et al., 2019)

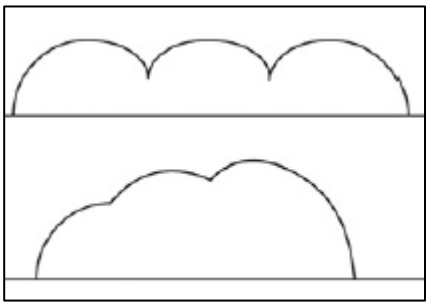


Figure 14: Défaut de non planéité due à une distance entre cordons trop grande ou trop faible (Xiong et al., 2013)

C'est au sein d'une couche qu'est choisi la trajectoire de fabrication. Celle-ci peut avoir une influence forte sur les accumulations de chaleur (Chergui, 2021) sur le temps de fabrication et sur les temps d'attentes nécessaires. Le second critère retenu est le temps de production d'une couche.

I.1.2.3. Critère d'évaluation des empilements

La qualité géométrique de l'empilement est un critère important à considérer. Il faut s'assurer que les dimensions des cordons et la qualité des recouvrements se maintiennent d'une couche sur l'autre. Il faut également s'assurer que la hauteur de couche se maintient au fur et à mesure de la construction de la pièce. Une augmentation de la distance pièce-torche au cours de la construction indique un phénomène de surchauffe provoquant un amincissement des couches produites et entraîne une déviation dans les paramètres de soudage. Il est donc important de s'assurer que cette distance soit constante au cours de l'empilement successif des couches.

I.1.3. Classification des paramètres influents

L'ensemble des paramètres accessibles et impactant lors du procédé WAAM-CMT a été classifié en 7 catégories dans le Tableau 1 suivant :

Tableau 1: Classification des paramètres de fabrication WAAM

Matière Première	**Débit matière**	**Energie d'arc**	**Torche**	**Température**	**Trajectoire**	**Empilement**
	Débit de gaz	Correction de Hauteur d'arc	CTWD	Température de Préchauffe		
	Vitesse de fil (WFS)	Paramètre spécifique de mode (EP/EN)	Vitesse de déplacement de torche (TS)	Température d'Interpass (ou idle time)	Ordre de dépose Surépaisseur (x-y)	Surépaisseur (z)
Loi synergique					Trajet de remplissage Sens et nombre de dépose Ecart vecteur	Incrément torche Orientation par rapport à la couche précédente
Dimensions et compositions : fil, substrat et gaz	Prégaz Postgaz	Paramètres spécifiques de début et fin d'arc (burnback, hotstart, Is, ts, Ie, te, $I_{ignition...}$)	Angles de torche (Work & Travel)		Type de cordon Sens de juxtaposition par rapport au contour	Ajustements Locaux

Le paragraphe suivant présente chacun de ces paramètres, son influence sur le procédé de fabrication WAAM et l'état des connaissances actuelles sur celui-ci.

I.1.4. Etat de l'art des paramètres listés

Un état de l'art des paramètres listés dans le tableau présenté précédemment est maintenant réalisé.

I.1.4.1. Matière première

Afin de réaliser une pièce en WAAM, il est important de définir le matériau dans lequel la pièce doit être réalisée. Un fil d'apport correspondant à la nature du matériau doit ainsi être choisi. La nature du substrat sur lequel sera construit la pièce doit être compatible avec la nature du fil d'apport. C'est-à-dire que les deux matériaux doivent pouvoir se souder ensemble. La qualité du fil d'apport est importante et définit la qualité de la pièce finale (Gu et al., 2014) ; (Ryan et al., 2018). Le gaz protecteur doit également être choisi en accord avec la nature du fil suivant les recommandations du fournisseur. Sa nature impacte grandement la stabilité de l'arc de soudage et de la piscine de fusion.

La géométrie du substrat est définie par rapport à son rôle et au positionnement de la pièce sur celui-ci. Si la pièce doit être usinée et le substrat détaché, il est recommandé que le substrat soit usinable et ait une épaisseur suffisante pour être maintenu correctement dans des mors de serrage. Un substrat épais permet de minimiser les déformations dues aux contraintes résiduelles imposées par le procédé de soudure.

Dans le cadre du projet, la pièce intelligente est réalisée en alliage d'aluminium 4043. En effet, celui-ci offre certaines facilités pour l'enfouissement de capteurs (Chapitre IV). Le fil choisi est donc un alliage d'aluminium ESAB Autrod 4043 de diamètre 1,2 mm. Le gaz utilisé est un gaz Arcal Prime (100 % Argon) compatible avec ce fil. Le substrat n'étant pas disponible en alliage d'aluminium 4043, un alliage d'aluminium 5083 est choisi car compatible.

I.1.4.2. Débit matière

a) Vitesse de dévidage de fil

La vitesse de dévidage de fil (WFS pour Wire Feed Speed) est un paramètre déterminant pour la forme du cordon. En CMT, c'est la vitesse de dévidage de fil moyenne et non instantanée qui est commandée, à cause du mouvement d'avance et de recul du fil. Il faut la comprendre comme une vitesse de consommation moyenne du fil. Plus la vitesse de fil demandée est importante, plus l'énergie de l'arc nécessaire pour fondre le fil à cette vitesse doit être importante. Ainsi augmenter WFS entraîne une augmentation de la puissance de soudure.

La vitesse de dévidage de fil (WFS) est définie dans le Chapitre II grâce à une campagne expérimentale.

b) Débit de gaz

Le débit de gaz doit être suffisant pour protéger le bain de soudure. Plus le débit est important, plus la zone protégée est importante. Pour des soudures aluminium ou cuivre, le gaz est inerte et n'interagit pas avec le métal fondu. Il a pour rôle de le protéger de la corrosion. Il a été observé que des débits de gaz importants permettaient de réduire le taux de porosités dans une pièce réalisée en aluminium (Arana et al., 2021). Pour les soudures aciers, aciers inoxydables et titane, le gaz interagit avec le métal fondu, il facilite l'étalement du cordon sur le substrat et stabilise l'arc de soudure. Un débit de gaz à 20 L/min (mathesongas.com, 2021) est recommandé dans la documentation de fil en alliage d'aluminium 4043 (AlSi5).

Les paramètres « prégaz » et « postgaz » définissent le temps pendant lequel le débit de gaz est activé avant et après la soudure lorsque la torche est à l'arrêt. Ces paramètres sont fixés à leur valeurs nominales soit 0,5 s.

I.1.4.3. Energie d'arc

a) Loi synergique

Le transfert de matière en soudure à l'arc change en fonction de la puissance apportée dans l'arc. Ces divers modes de transferts peuvent être repérés sur un graphique Tension-Intensité (Figure 15). Le mode le moins énergétique en soudure MIG est appelé « court-circuit » ou « arc court ». La soudure CMT et ses variantes sont encore moins énergétiques (Figure 16).

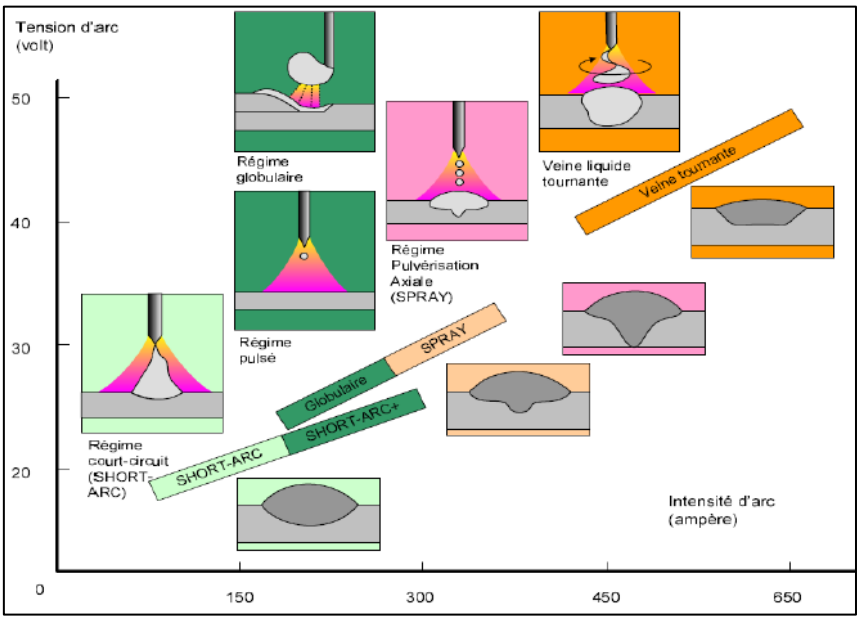


Figure 15: Classification des modes de transfert sur un graphique tension-intensité (FRONIUS France, 2017b)

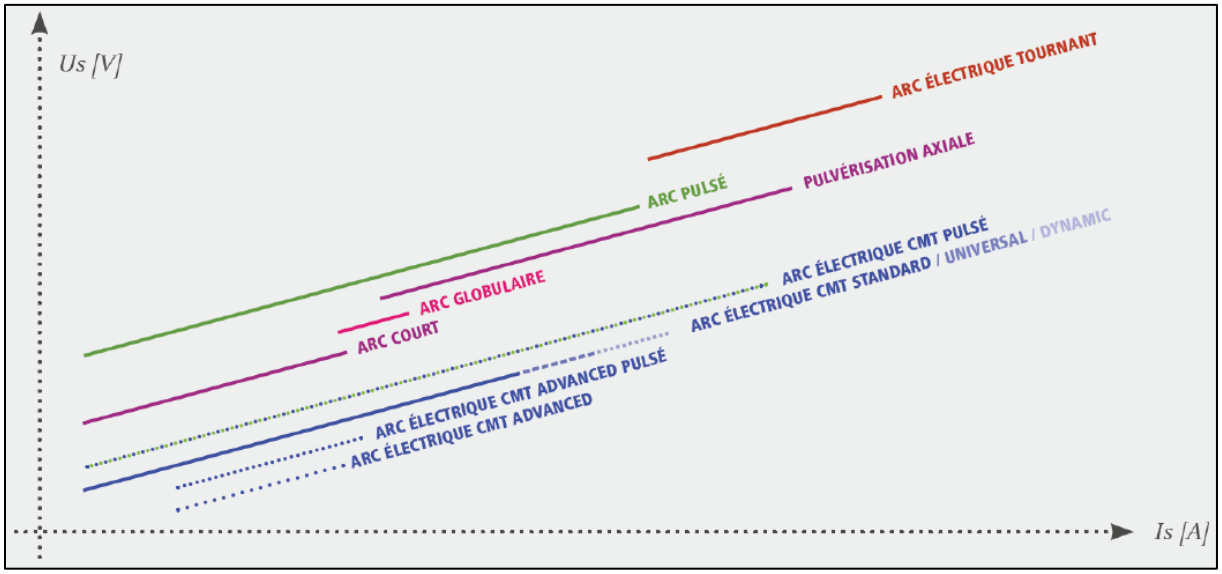


Figure 16: Classification des modes CMT par rapport aux autres mode de transfert sur un graphique tension-intensité (FRONIUS France, 2017a)

La soudure CMT est développée sur un poste de soudure synergique. Un poste de soudure synergique est un poste qui adapte la tension et l'intensité du courant de l'arc en fonction de la vitesse de dévidage de fil voulue et d'une loi « synergique » enregistrée dans le poste. Une loi synergique est définie en fonction du fil et du gaz d'apport : la nature et le diamètre du fil d'une part ; et la nature du gaz d'autre part. Elle est définie également pour un type de soudure souhaitée : MIG, Pulsée, CMT, CMTA, CMTP ou CMTPA.

Le paramètre d'entrée de la loi synergique est la vitesse moyenne de dévidage de fil. Une loi est définie par points et par une interpolation linéaire entre les points de définition. Cette loi associe pour une vitesse de dévidage de fil moyenne donnée, une courbe d'intensité donnée. Le comportement électrique d'un cycle CMT est défini par de nombreux paramètres mais une intensité et une tension moyenne développées lors de la soudure sont renseignées et permettent de calculer plus aisément la puissance moyenne développée. Ainsi, sur la fenêtre paramétrique de la loi, définie par une vitesse de fil minimale et maximale, la puissance moyenne ne varie pas linéairement avec WFS comme il est souvent simplifié, mais linéairement par morceaux (Figure 17).

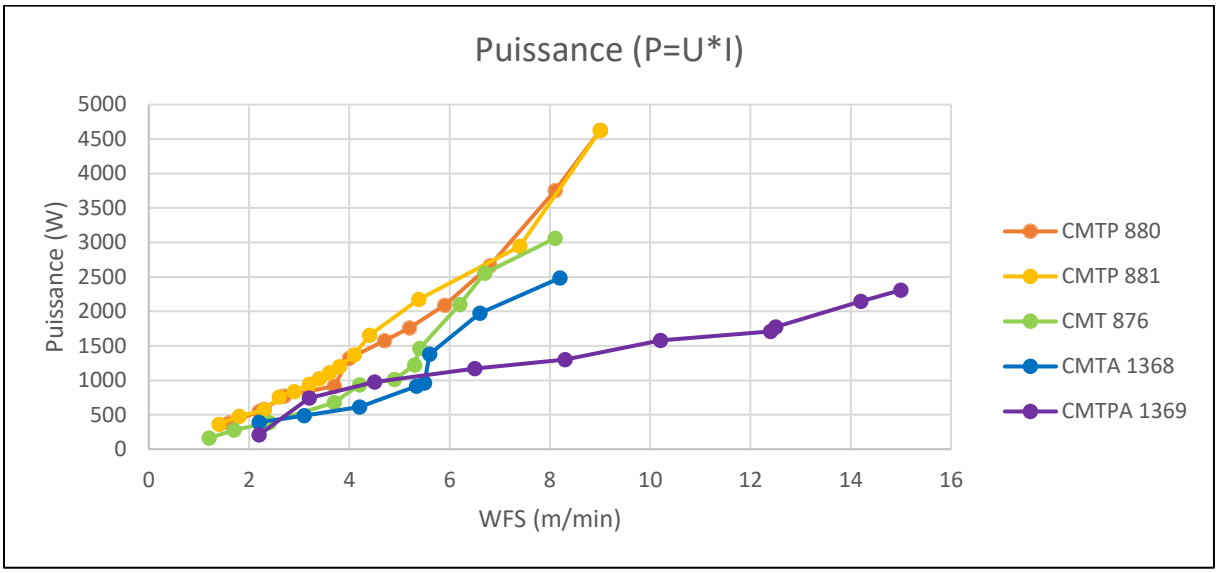


Figure 17: Graphique Puissance-WFS des synergies CMT disponibles pour un fil AlSi5 de diamètre 1,2 mm et un gaz 100 % Ar

Le mode CMTPA est choisi pour la suite de l'étude. Il a été montré par (Cong et al., 2015) que ce mode produisait moins de porosités grâce à son faible apport énergétique. L'alternance de polarité du mode CMTPA au cours de la soudure entraîne également ce qui est appelé un nettoyage cathodique (Ayarkwa et al., 2017), (Cong et al., 2015). Cela permet d'enlever l'oxyde qui recouvre naturellement le fil et le substrat et qui dégrade les propriétés mécaniques d'une soudure. De plus (Zhang et al., 2018) avancent que l'alternance de polarité permet d'obtenir une microstructure plus fine formée de grains équi-axes. Il est enfin à noter que pour des hautes vitesses de fil, la loi CMTPA 1369 a l'énergie massique la plus faible par rapport aux synergies développées pour le fil et le gaz utilisé (Figure 18). Minimiser l'énergie massique permet d'apporter moins d'énergie à la matière apportée lors de la soudure. Cela permet de minimiser la température à laquelle cette matière est chauffée. Cela permet donc de minimiser le temps d'attente pour revenir à la température souhaitée entre chaque cordon améliorant la rapidité de construction de la pièce. Cela permet également de réduire le taux de porosités dans la matière apportée. La loi 1369 est donc la synergie choisie pour la suite de l'étude.

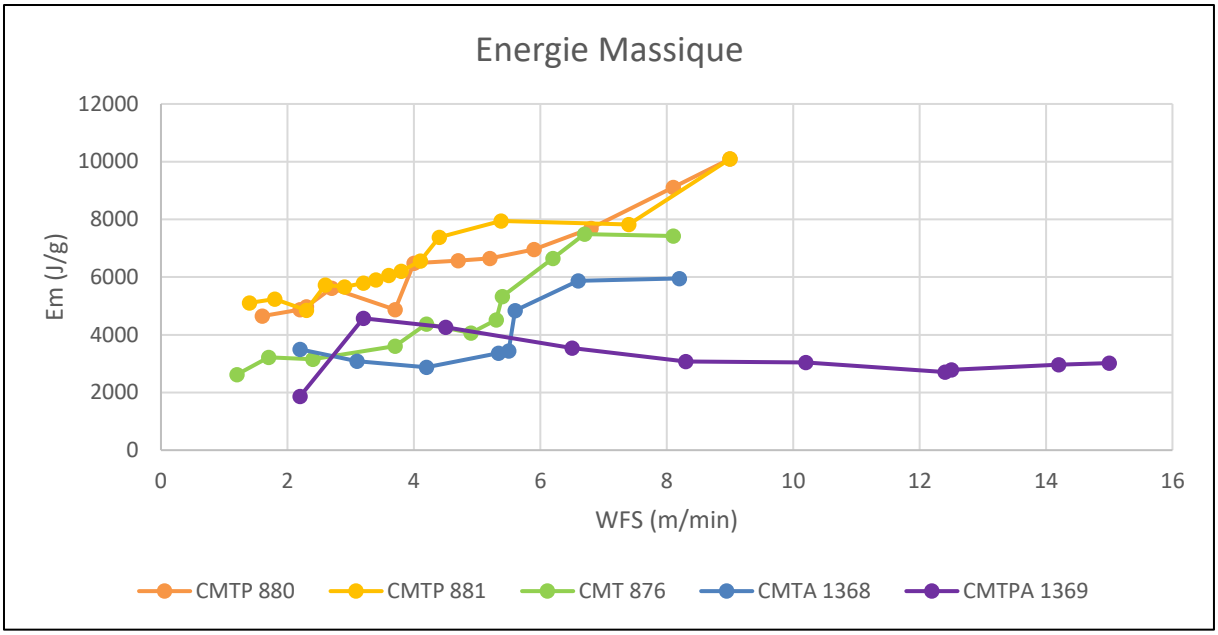


Figure 18: Energie massique des synergies disponibles pour un fil AlSi5 de diamètre 1,2mm

b) Correction de Hauteur d'arc

La correction de hauteur d'arc est un paramètre permettant de modifier la hauteur de l'arc électrique produit et par conséquent son énergie. Ce paramètre varie de -30 % à +30 %. (FRONIUS France, 2017c) indique que ce paramètre a peu d'influence pour les soudures peu énergétiques, comme les soudures CMT et celles dont le mode de transfert principal est le « court-circuit ». La correction de hauteur d'arc n'est donc pas pertinente à étudier pour la suite de l'étude. Elle est donc fixée à sa valeur nominale : 0 %.

c) Paramètre spécifique de mode : EP/EN

Certains paramètres d'arcs sont spécifiques au mode de soudure choisi. Il peut s'agir d'une correction d'arc dynamique pour le soudage MIG et CMT, d'une correction d'arc pulsé pour le soudage pulsé ou certaines lois CMTP, d'une balance CMT/Pulse pour d'autres lois CMTP ou d'un paramètre de balance EP/EN (Electrode Positive / Electrode Négative) pour les modes CMTA et CMTPA. Ces paramètres influencent différents aspects de l'arc et sont tous contrôlés sur une fenêtre paramétrique allant de -5,0 à +5,0.

Le paramètre EP/EN des modes CMTA et CMTPA représente une balance entre le nombre de cycles à polarité négative du fil avec le nombre de cycles à polarité positive du fil. L'évolution du ratio nombre de cycles positifs – nombre de cycles négatifs n'est pas identique pour les 2 modes et ne varie pas forcément linéairement. Ces variations sont décrites pour 2 lois CMTA et CMTPA (Figure 19). Ce paramètre influence directement la puissance produite par l'arc (Figure 20). Les cycles à polarité négative du fil suivent des courbes d'intensité plus faibles que les cycles à polarité positive du fil (Scotti et al., 2020) et les privilégier donne une soudure moins énergétique.

Le paramètre EP/EN est défini dans le Chapitre II grâce à une campagne expérimentale.

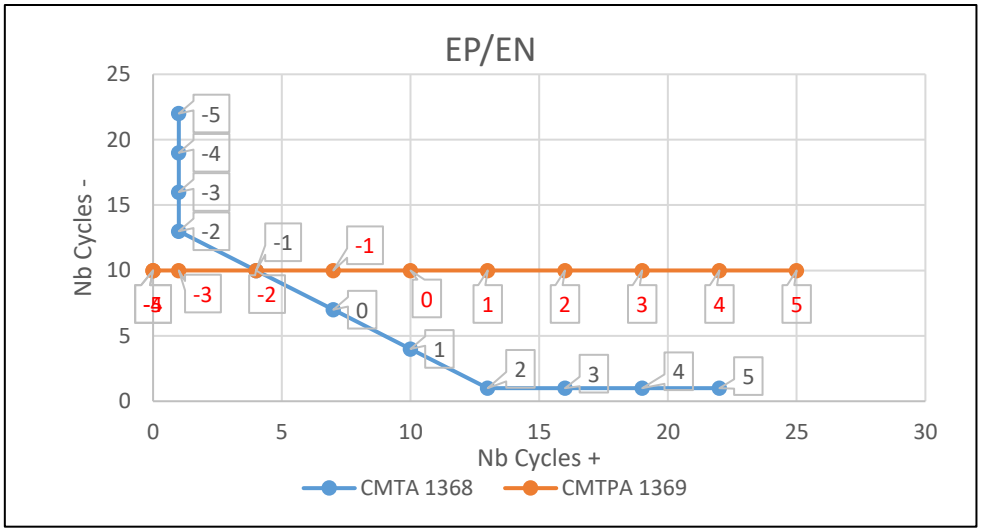


Figure 19: Evolution du nombre de cycle à polarité négative par rapport au nombre de cycle à polarité positive pour une balance EP/EN allant de -5 à 5 pour les lois CMTA et CMTPA disponibles pour du fil AlSi5 en 1,2mm

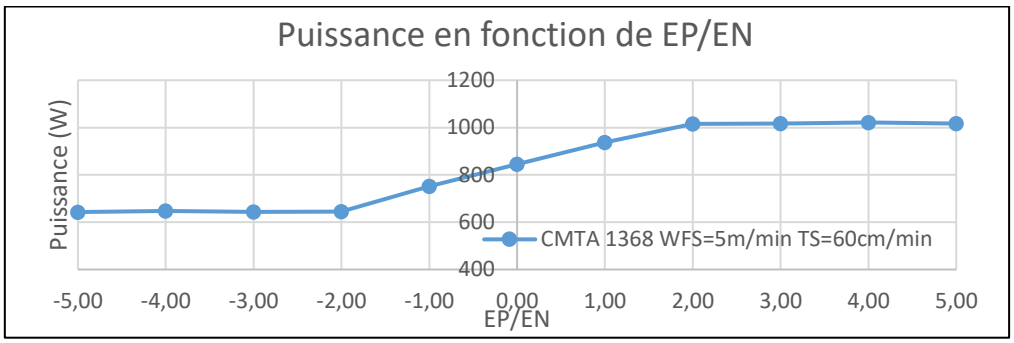


Figure 20: Evolution de la puissance développée par la soudure en fonction de EP/EN pour la loi CMTA 1368

d) Paramètres spécifiques de début et fin d'arc

De nombreux paramètres permettent de définir le comportement de l'arc de soudure en début et en fin de cordon. Ces paramètres ne font pas l'objet de cette étude qui se concentre sur les dimensions du corps du cordon. Ils sont donc fixés par la suite à leur valeur nominale.

I.1.4.4. Torche

a) CTWD

La distance entre le substrat et la torche de soudure influence grandement l'état de la soudure et les paramètres électriques et de débit de matière qui lui sont reliés. Le positionnement de la torche est défini par l'origine outil, le TCP (Tool Center Point). Cette origine est paramétrée à une distance spécifique de la sortie du tube contact dépendant du diamètre de fil choisi. Le TCP est généralement positionné à une distance régie par une pointe de calibration et qui vaut environ 14 fois le diamètre du fil (soudeurs.com, 2014). Le positionnement de la torche doit se faire de manière à ce que le TCP soit au niveau de la surface de dépose. La distance entre la surface de dépose et le tube contact est appelé Contact Tip to Work Distance (CTWD) (Figure 21). Il est important de garder cette distance constante au fur et à mesure de la dépose et donc pour cela de paramétrer correctement l'incrément de hauteur à appliquer à la torche entre deux couches. En effet une augmentation de celle-ci entraine une augmentation du stickout (c'est-à-dire de la longueur de fil sortie) généré par le poste de soudure pour garder une hauteur d'arc constante. En revanche, cela entraine une augmentation du débit de fil moyen (WFS) et de la tension de soudure (Figure 22) (FRONIUS France, 2010). CTWD est fixé à 17 mm soit environ 14 fois le diamètre du fil de 1,2 mm (soudeurs.com, 2014).

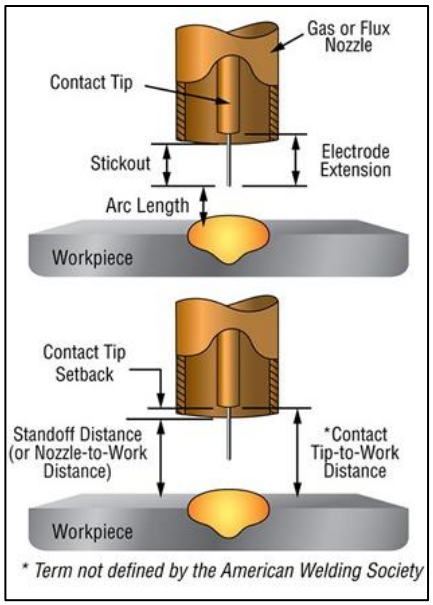


Figure 21: Définition des distances torche-substrat (millerwelds.com, 2019)

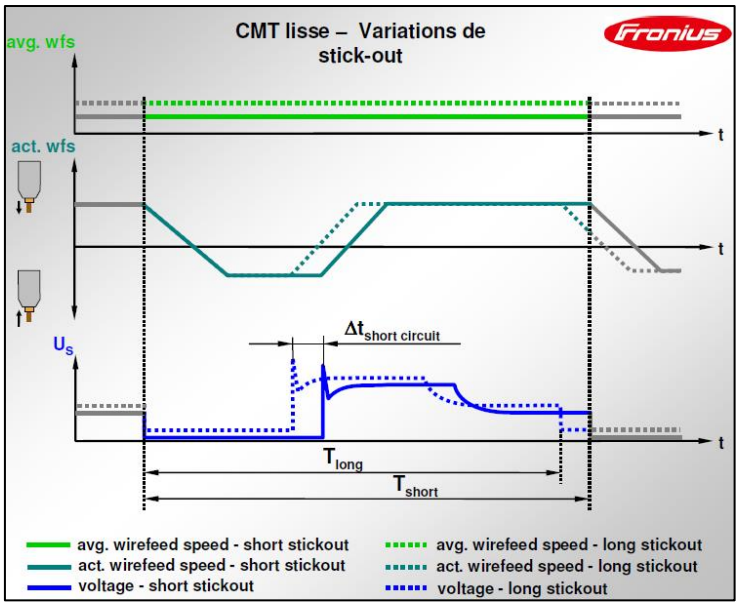


Figure 22: Impact du stickout sur WFS et U d'un cycle CMT (FRONIUS France, 2010)

b) Angle de torche

La position de la torche par rapport à la ligne de soudure à réaliser se définit également par deux angles connus sous les noms de « Work angle » et « Travel angle » (Figure 23).

Le « Work angle » définit l'angle de la torche projeté dans le plan vertical et normal à la ligne de soudure. Afin de ne pas créer de dissymétrie dans le profil du cordon, il est maintenu à 0°.

Le « Travel angle » définit l'angle de la torche projeté dans le plan vertical et tangent à la ligne de soudure. Il permet d'influencer la hauteur et la pénétration du cordon de soudure. Si la torche tire, alors le cordon est plus bas et plus pénétrant; si la torche pousse alors le cordon est plus haut et moins pénétrant (Su and Chen, 2019). L'influence du « Travel angle » n'est pas étudiée. La torche reste donc en position neutre, perpendiculaire au substrat, dans un mode de déposition 3 axes.

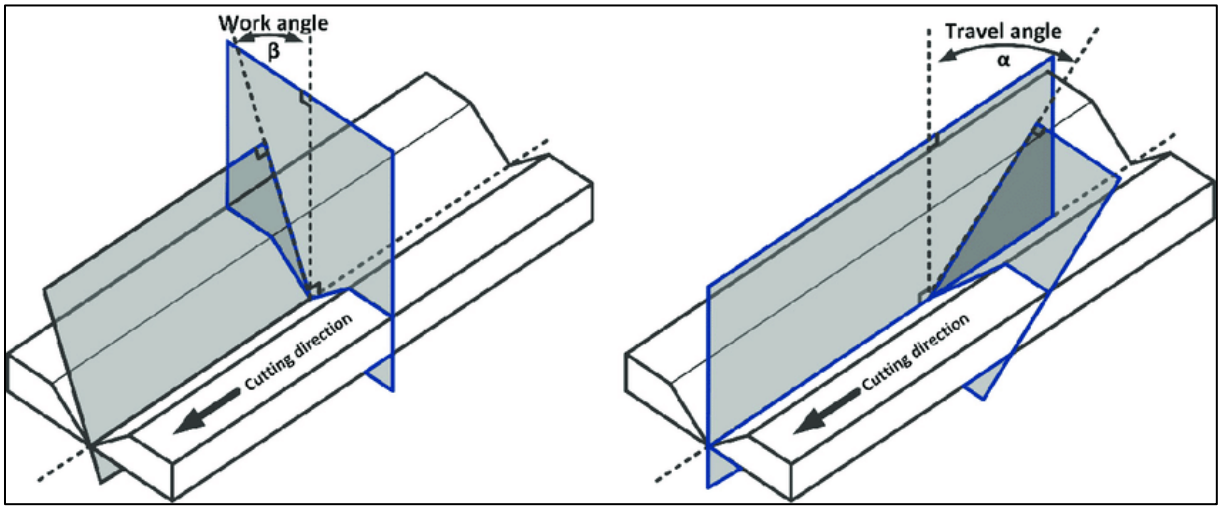


Figure 23: Définition du Work Angle et du Travel Angle (Villumsen and Kristiansen, 2015)

c) Vitesse de déplacement de la torche

La vitesse de déplacement de torche (TS pour Torch Speed ou Travel Speed ; parfois Scanning Speed ou Welding Speed) est un paramètre important pour déterminer la dimension du cordon de

soudure. Il s'agit de la vitesse de parcours de la trajectoire spécifiée. Pour une vitesse de dévidage de fil donnée, plus la vitesse de déplacement de torche est grande, plus le cordon est fin.

La taille du cordon de soudure est définie par le rapport λ_{ratio} = WFS/TS et représente le nombre de mètres de fil consommé par mètre de soudure réalisée. Lorsque TS est trop important par rapport à l'énergie de soudure déployée, le reflux de métal fondu dans le bain de fusion est trop important et se refroidi trop rapidement (Adebayo et al., 2013; Nguyen et al., 2005) (Figure 24). Le cordon présente alors des irrégularités dimensionnelles périodiques, ce défaut est appelé « humping » (Figure 25).

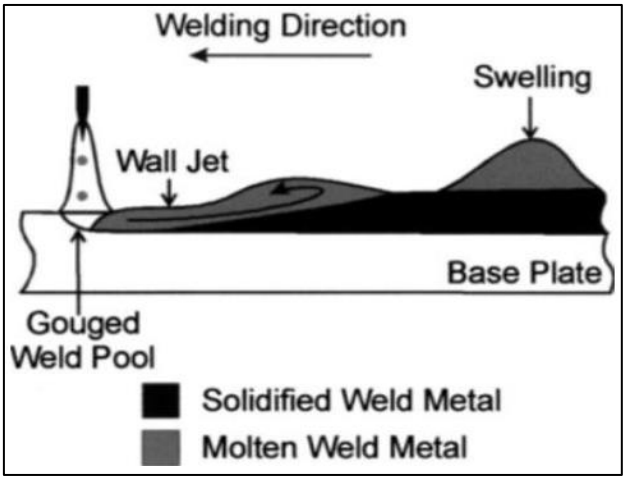


Figure 24: Schéma du mouvement de reflux créant le phénomène de "humping"(Adebayo et al., 2013)

Figure 25: Cordons irréguliers présentant un défaut de "humping"

La vitesse de déplacement de torche est sélectionnée à travers le choix d'un apport instantané de matière λ_{ratio} = WFS/TS dans une campagne expérimentale développé dans le Chapitre II.

I.1.4.5. Température

a) Température de préchauffe

Maintenir le substrat à une température de préchauffe permet d'améliorer la mouillabilité, c'est-à-dire l'étalement des cordons obtenus lors de la réalisation de la première couche. En préchauffant le substrat, il est possible d'obtenir des cordons mouillés avec des paramètres de soudure peu énergétiques qui auraient produit un cordon non stable ou non mouillé sur un substrat à température ambiante. Les fournisseurs de fil recommandent des températures de préchauffe lorsque certaines pièces massives doivent être soudées (Boehler Voestalpine, 2014). Cette température est grandement liée à la nature du fil et impacte la santé matière de la soudure finale obtenue. Préchauffer le substrat permet de réduire les défauts de « humping » (Geng et al., 2017) mais également de réduire les contraintes résiduelles et les potentielles déformations ou fissurations créées lors des soudures en réduisant le gradient thermique produit (Xiong et al., 2017). Une température de préchauffe à 150 °C

est choisie pour la suite car recommandée pour un fil en alliage d'aluminium AlSi5 de diamètre 1,2 mm par certains fournisseurs (Boehler Voestalpine, 2014).

b) Temps d'attente et Température « d'interpass »

Le temps d'attente (ou idle time) observé entre la dépose de deux cordons a une influence significative sur la qualité et la forme des pièces réalisées. Ne pas observer de temps d'attente ou des temps d'attente très courts conduit à une accumulation de chaleur et à un effondrement progressif des cordons déposés. Si aucun temps d'attente ne peut être observé durant la construction, modifier les paramètres de fabrication au cours du procédé est un levier possible pour éviter l'accumulation de chaleur (Robert et al., 2018). Observer un temps d'attente trop court entraine une surchauffe et ne permet pas de conserver un cordon stable. Observer un temps d'attente très long permet de revenir à température ambiante et d'avoir des conditions de déposes constantes. Cependant cela n'est pas très efficace.

Il a été montré par (Chergui, 2021) que le temps d'attente nécessaire pour revenir à une même température de surface entre deux déposes augmente au fur et à mesure de la construction d'un mur. Cela permet d'obtenir des cordons de dimensions stables et régulières tout au long de la construction sans perdre top de temps. Il est donc important de mesurer la température de la surface sur laquelle un cordon doit être soudé. Cette température est appelée température « d'interpass ». Elle dépend fortement du matériau qui doit être déposé. L'historique thermique du matériau déposé définit la microstructure et les propriétés mécaniques de la pièce finale.

Un cordon de couche supérieure peut ne pas avoir les mêmes dimensions qu'un cordon de première couche alors qu'ils ont été déposés sur des surfaces de températures égales. En effet, le cordon peut changer de dimensions car le volume du substrat sur lequel est soudé le cordon grandit au fur et à mesure de la construction de la pièce et absorbe plus efficacement la chaleur par conduction (Figure 26). Il peut donc être nécessaire pour réaliser les couches supérieures d'observer une température « d'interpass » différente de la température de préchauffe ou bien d'adapter la distance entre deux cordons à leurs nouvelles dimensions.

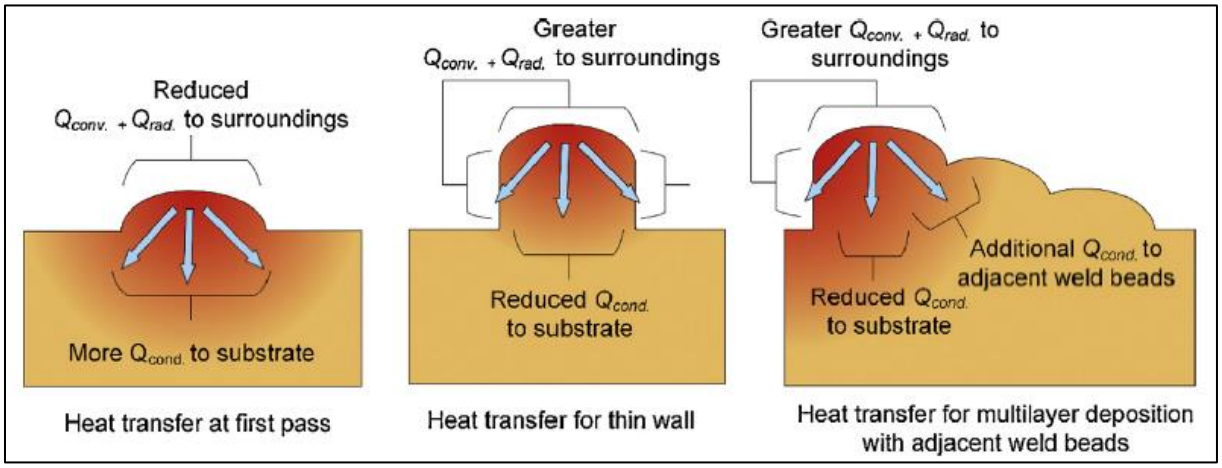


Figure 26: Transfert de chaleur par conduction et par convection pour un cordon, un mur et un bloc (Cunningham et al., 2018)

La température « d'interpass » pour les couches supérieures doit être définie par une campagne expérimentale présentée dans le Chapitre II.

I.1.4.6. Trajectoire

L'ensemble des paramètres présentés dans ce paragraphe détermine la trajectoire de remplissage d'une couche.

a) Ecart vecteur

Un des paramètres déterminant pour réaliser la couche est la distance à paramétrer entre deux cordons voisins. Cette distance appelée « écart-vecteur » ou « overlap distance » ou « center distance » a été étudiée par de nombreux auteurs.

Elle est définie comme le produit du taux de non recouvrement : *a* (ou step-over rate) par la largeur du cordon *w*. Il existe une distance optimale permettant de maximiser la planéité de la couche en cours de construction et d'obtenir un recouvrement stable et répétable. Cette distance dépend du modèle de recouvrement choisi et de la forme du cordon considéré (Tableau 2).

Deux modèles de recouvrement distincts ont été étudiés : le modèle FOM (Flat Top Overlapping Model, Figure 27) et le TOM (Tangent Overlapping Model, Figure 28). Le modèle FOM a été étudié pour des sections de cordons paraboliques, circulaires et sinusoïdales. Un écart vecteur de 2/3 de la largeur du cordon est alors recommandé pour les cordons paraboliques (Suryakumar et al., 2011), (Xiong et al., 2013). Un écart de 63,67 % de la largeur du cordon est recommandé pour un modèle sinusoïdal de cordon (Cao et al., 2011). Pour les cordons circulaires, la valeur recommandée dépend du rapport Φ largeur/hauteur du cordon (Aiyiti et al., 2006). Cependant, ce modèle de recouvrement ne semble produire des recouvrements convenables que pour des cordons ayant un rapport Φ >4. (Liu et al., 2020) calculent l'écart-vecteur (d) en divisant l'aire du cordon ($A_{cordon} = \pi \frac{\emptyset_{fil}^2}{4} \lambda$) par sa hauteur (h). Cela revient au même calcul de distance que pour le modèle FOM (Figure 29). Le modèle TOM a été étudié pour les cordons paraboliques. Un écart vecteur de 0,738*w, avec w étant la largeur du cordon est recommandé (Ding et al., 2014).

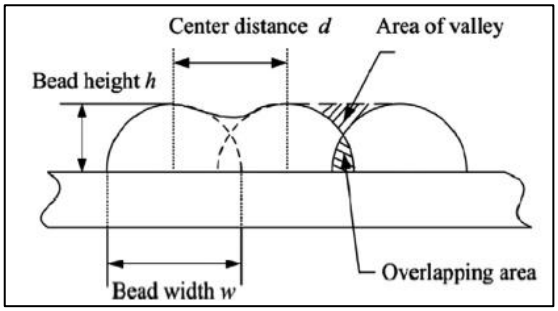


Figure 27: Modèle de recouvrement FOM

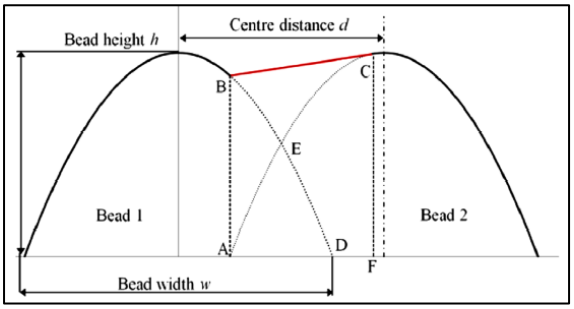


Figure 28: Modèle de recouvrement TOM

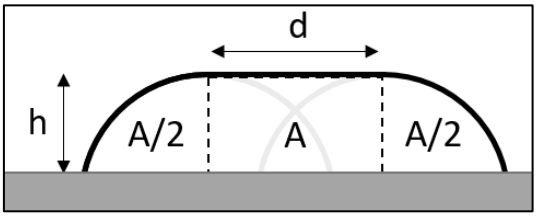


Figure 29 : Répartition de l'aire du modèle FOM

Tableau 2: Tableau récapitulatif des écarts vecteurs recommandés en fonction du modèle de recouvrement et de cordon choisi

	Parabolique	**Sinusoïdal**	**Arc de cercle**
FOM ou A/h	0,667w	0,6366w	$\left(\left(\left(arctan\left(\frac{2}{\Phi}\right)\right)\left(\frac{1}{2\Phi}+\frac{\Phi}{4}+\frac{\Phi^3}{32}\right)\right)-\frac{\Phi^2}{16}+1\right)w$
TOM	0,738w	/	/

Des écarts-vecteurs compris entre 0,667w et 0,738w sont aptes à réaliser des pièces massives. Un écart-vecteur de 0,667w est sélectionné pour la suite, c'est une valeur régulièrement utilisée (Plangger et al., 2019).

b) Trajet de remplissage, nombre et sens des déposes

Le trajet suivi par la torche pour former la couche, c'est-à-dire son parcours, est le premier paramètre à définir. La trajectoire influence fortement la contrainte résiduelle créée par le procédé (Zhang et al., 2020) et (Nickel et al., 1999) montrent qu'une trajectoire en contour produit moins de contrainte résiduelle par rapport à une trajectoire zigzag. Cette contrainte résiduelle peut être amoindrie par des systèmes de post-traitement comme du martelage (Hönnige et al., 2018) ou du roulage (Colegrove et al., 2013) mais ils ne sont pas adaptés pour des trajectoires courbes.

Les trajectoires les plus communes suivent des lignes parallèles ou une courbe décalée du contour (Figure 31) ou de l'axe médian de la couche (Singh et al., 2021). Cependant des stratégies hybrides mêlant contours et lignes parallèles (Figure 32) ou des stratégies suivant des motifs de remplissage existent également (Zhao and Guo, 2020), (Ding et al., 2016a).

(Ding et al., 2016b) ont également mis au point une stratégie où les paramètres de fabrication et les écarts-vecteurs s'adaptent pour minimiser le nombre de soudures et obtenir des contours de pièce de meilleure qualité. Cela nécessite auparavant d'avoir réalisé une bibliothèque complète des cordons avec leurs dimensions et leurs paramètres d'obtention.

Il est également possible de produire une trajectoire de type balayage ou similaire (Figure 30). Il est ainsi possible d'utiliser ce type de trajectoire pour produire un cordon plus large (Ma et al., 2019), (Bourlet, 2019), ou recouvrir complètement une surface. Cependant, la torche suit ainsi un trajet ayant un taux de recouvrement non constant. Cela a tendance à occasionner une différence de hauteur entre les points de retournement et le centre de la trajectoire oscillante (Fritz, 2018). De plus ce type de trajectoire est continue et peut donc conduire à une accumulation de chaleur et à un affaiblissement des propriétés mécaniques de la pièce.

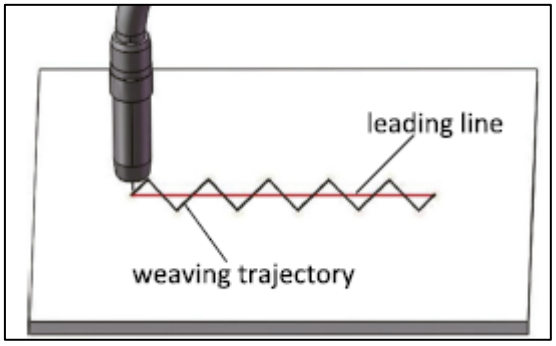


Figure 30: Réalisation de pièce massive par balayage (Ma et al., 2019)

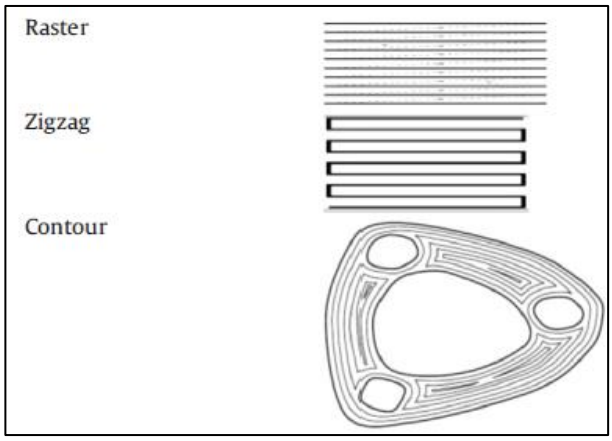


Figure 31: Trajectoires classiques(Ding et al., 2015)

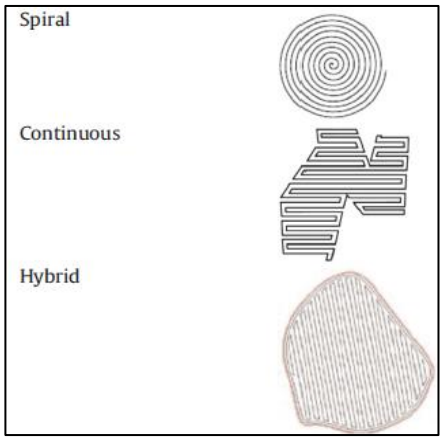


Figure 32: Trajectoires complexes (Ding et al., 2015)

Le nombre de soudures en laquelle est divisée une trajectoire et le sens de parcours de celle-ci sont des paramètres qui jouent un rôle important sur la qualité géométrique et sur la santé matière de la pièce réalisée. Ces paramètres régissent directement le placement et le nombre des débuts et fins de cordons de soudure.

Les départs et arrêts d'arc sont des lieux de fragilité où les paramètres de soudure sont en régime transitoire et donnent lieu à des caractéristiques matériau appauvries. Il est conseillé de les minimiser ou de les placer à des endroits non critiques ou usinables en périphérie de la pièce.

Il est important lors de la juxtaposition de plusieurs cordons d'alterner leur sens de dépose afin que les défauts de bosse présents au début d'un cordon soient mitigés par le défaut de creux présent à la fin du cordon voisin. Cela permet notamment d'éviter l'accroissement des défauts lors de la réalisation d'une pièce en WAAM. (Ma et al., 2019)

La dépose en continue permet de minimiser le nombre d'amorçage et d'extinction d'arc et donc le nombre de fragilité mais peut entraîner une surchauffe qui entraine un effondrement du cordon et une dégradation des propriétés mécaniques de la pièce produite.

Une trajectoire en zigzag discontinue (Figure 33) est sélectionnée pour la suite.

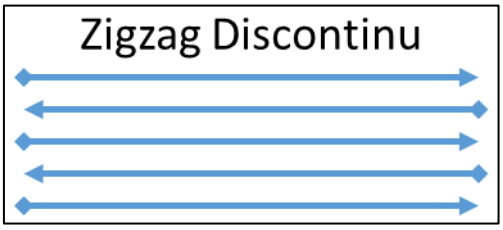


Figure 33: Dépose en zigzag discontinu

c) Sens de juxtaposition par rapport au contour

Il a été remarqué que pour des pièces longilignes, des petits dépôts transversaux permettaient de produire moins de déformations que des dépôts longitudinaux (Bourlet et al., 2017) ; (Nickel et al., 1999), Figure 34.

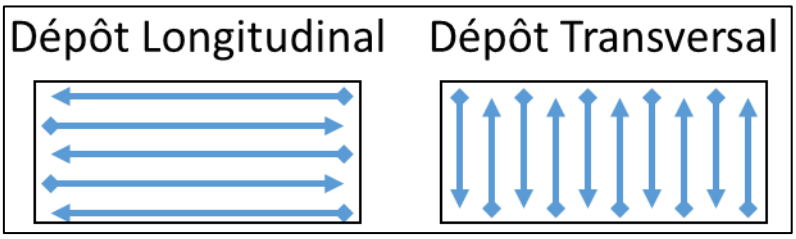


Figure 34: Dépôt Longitudinal et Transversal

d) Ordre de juxtaposition

L'ordre de dépose des cordons d'une couche est actuellement un paramètre encore peu investigué pour la technologie WAAM mais qui peut avoir un rôle important à jouer dans le temps d'attente à observer entre deux soudures et la création de contraintes résiduelles (Kerninon et al., 2008).

(Y. Li et al., 2018a) ont également remarqué que lorsqu'un cordon était déposé en premier sur le bord d'une couche supérieure, il tendait à être plus aplati, et s'il était déposé en dernier, il tendait à être plus étroit par rapport aux autres cordons de la couche.

I.1.4.7. Paramètres d'empilement

a) Orientation et sens de dépose entre couches

L'état de surface des pièces produites par le procédé WAAM présente une forte sinuosité. Afin de ne pas créer de manque de recouvrement entre cordons, il est conseillé de garder une même direction de dépose tout au long de la réalisation d'une pièce (Fritz, 2018). Cela permet de déposer les cordons sur des lignes peu sinueuses qui sont dans le sens de dépose des cordons de la couche précédente plutôt que dans le sens de juxtaposition des cordons de la couche précédente.

L'orientation n'est pas changée entre deux couches. Cependant le sens des déposes est inversé entre chaque couche afin de compenser les défauts de bosses des cordons de la couche inférieure avec les défauts de creux des cordons de la couche en cours de déposition (Figure 35).

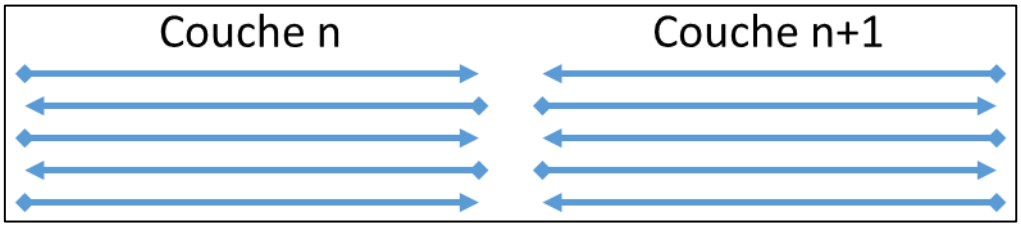


Figure 35: Dépôt sur deux couches successives

b) Incrément torche / Hauteur de couche

(Y. Li et al., 2018a) recommandent d'incrémenter la hauteur de couche par la hauteur moyenne calculée sur la couche qui vaut (***2h/3a***), ou ***a*** est le taux de non-recouvrement et ***h*** la hauteur du cordon. Il est important de paramétrer correctement l'incrément de hauteur entre chaque couche de manière à garder CTWD constant et donc un débit matière et une tension constante (Figure 22). En outre, une augmentation de cette distance au fur et à mesure de la dépose éloigne le débit de gaz de la soudure et peut réduire ainsi la protection qui lui est offerte. A l'inverse une diminution de CTWD peut entraîner un choc entre la torche et la pièce en construction. Une hauteur de couche correspondant à ***2h/3a*** est utilisée pour la suite.

c) Ajustements locaux

Enfin, (Y. Li et al., 2018b) expliquent que le premier cordon déposé est un cas particulier car c'est le seul qui ne recouvre aucun cordon et qui est véritablement à plat. Cela entraine donc une distance par rapport à celui-ci différente de celle avec les autres cordons à déposer. Il calcule cette distance via un algorithme et un réseau de neurone. Ils montrent également que les bords des couches réalisés dans un bloc ont tendance à s'effondrer et notamment le côté par lequel les premiers cordons sont réalisés (Y. Li et al., 2018a). Ils expliquent cela par une hauteur moyenne plus faible localement, due au manque de matière sur les bords à compenser et à la hauteur moyenne du premier cordon plus faible. Ils compensent ce phénomène par une baisse de la vitesse de torche entrainant un apport plus important de matière. Ils montrent également que lorsque les cordons de bord sont soudés en dernier, ils ont moins tendance à s'effondrer car ils sont retenus par leur voisin, et sont en revanche moins larges.

(Y. Li et al., 2018a) ont montré que la hauteur moyenne d'une couche est plus faible sur les cordons de bord. Cela explique l'effondrement sur les bords qui est présent lors de la réalisation de blocs. Il est important d'obtenir une hauteur moyenne constante sur tout le contour de la couche réalisée. Pour cela il faut donc soit adapter les paramètres de fabrication sur les bords, soit rajouter des cordons de surépaisseur si la pièce est par la suite usinée.

Aucun ajustement local n'a été sélectionné pour la suite.

I.1.5. Synthèse

Un grand nombre de paramètres a ainsi été fixé grâce à l'étude bibliographique menée (Tableau 3). Les verrous restants sont la détermination de :

- La vitesse de dévidage de fil (WFS), la balance EP/EN, la vitesse de déplacement de la torche (TS) et la température « d'interpass »
- L'ordre de dépose des cordons et les surépaisseurs à ajouter aux dimensions nominales

La section suivante présente les méthodes envisageables pour déterminer la valeur de ces paramètres.

Tableau 3: Tableau de synthèse des paramètres de fabrication WAAM

Matière Première	Débit Matière	Energie d'arc	Torche	Température	Trajectoire	Empilement
	Débit de gaz *20 L/min*	**Correction de Hauteur d'arc** *0 %*	**CTWD** *17 mm*	**Température de Préchauffe** *150 °C*		
	Vitesse de fil (WFS)	**Paramètre spécifique de mode (EP/EN)**	**Vitesse de déplacement de torche (TS)**	**Interpass T° (ou idle time)**	**Ordre de dépose** **Surépaisseur (x-y)**	**Surépaisseur (z)**
	Loi synergique *CMTPA 1369*				**Trajet de remplissage** **Sens de dépose** **Nombre de dépose** *Zigzag discontinu* **Ecart vecteur** *0,667w*	**Incrément torche** *2h/3a (a=0,667)* **Orientation par rapport à la couche précédente** *inversée*
Dimensions et compositions : fil, substrat et gaz *4043, $Ø_{fil}$ =1,2 mm* *5083, 250*250*5 mm³* *100 % Argon*	**Prégaz & Postgaz** *0,5 s*	**Paramètres spécifiques de début et fin d'arc (burnback, hotstart, Is, ts, Ie, te, $I_{ignition...}$)** *Nominaux*	**Angle de torche (Work & Travel)** *0°& 0°*		**Type de cordon** *Droit* **Sens de juxtaposition par rapport au contour** Transversal ou Longitudinal	**Ajustements Locaux** *Non réalisés*

Légende :	**A définir par un plan d'expériences**	**Hors du périmètre**	**Connaissance métier**	**Donné par la littérature scientifique**	**Proposition auteur**

I.1.6. Etat de l'art des méthodes de détermination des paramètres

Le Tableau 3 montre qu'il reste des paramètres à fixer. De nombreux auteurs ont proposé des méthodes de fabrication de pièces massives en WAAM ou ont réalisé des études permettant de définir des enveloppes paramétriques de travail. L'étude de leurs travaux permet de définir comment fixer les derniers paramètres non définis par la section I.1.4.

(Fritz, 2018) a notamment proposé une carte de décision très détaillée et étudiée sur 6 cas d'études différents réalisés en acier. Cependant cette méthodologie de choix est essentiellement basée sur une méthode de comparaison 2 à 2. Par exemple, elle ne laisse le choix qu'entre deux sets de paramètres de soudage correspondant à une condition très énergétique et à une condition peu énergétique.

(Xu et al., 2019) proposent une étude pour réaliser des blocs en aciers maraging. Grâce à un plan d'expériences dans lequel ils soudent des cordons pour différents niveaux WFS/TS et WFS. Ils éliminent ceux montrant des défauts de régularité ou de bosse et arrivent à définir une enveloppe paramétrique. WFS>6 – WFS/TS>20. Ils testent ensuite les cordons pour trois trajectoires différentes pour réaliser le bloc. Une où le bloc est formé par zigzag continu, une où il est formé par stratégie raster et une dernière où ils juxtaposent des cordons réalisés par balayage. Ils obtiennent des blocs sans défaut sur la dernière stratégie.

(Bourlet, 2019) propose une étude réalisée sur des cordons en acier. Il réalise un plan d'expériences en soudant des cordons avec divers paramètres (WFS-TS) et élimine ceux qui n'ont pas de dimensions régulières. Il propose ensuite de réaliser un bloc ou mur épais et de l'inspecter par coupe macrographique afin de s'assurer qu'ils ne présentent pas de manque de recouvrement. Cela demande donc beaucoup de temps pour vérifier tous les sets de paramètres testés. Il arrive cependant à délimiter un domaine opératoire pour la réalisation de murs épais.

(Quérard, 2019) réalise une étude pour trouver des sets de paramètres (WFS-TS) convenables pour la première couche d'une part et pour les couches supérieures d'autre part sur des pièces en alliage d'aluminium. Il propose une sélection de cordon basée sur le critère dimensionnel suivant : le cordon doit être aussi large que haut. Si le cordon est plus large que haut, il est considéré comme effondré et il ne le sélectionne pas. Ainsi il utilise une trajectoire de dépôt en zigzag continue par rapport à une trajectoire par décalage de contour pour obtenir un mur épais. La trajectoire choisie permet d'accumuler la chaleur lors du dépôt et d'obtenir une densité correcte par rapport à la trajectoire par contour sur laquelle des manques de recouvrement apparaissent. Il sélectionne les sets de paramètres de première couche en réalisant des murs fins et en les soumettant à des tests d'arrachement. Ceux qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats sont sélectionnés.

De nombreux autres auteurs fabriquent des pièces massives en aluminium mais n'étudient qu'un paramètre et ne proposent pas de méthode de sélection des paramètres (WFS — λ_{ratio} – EP/EN)

(Arana et al., 2021; Z. Li et al., 2018; Ma et al., 2019), réalisent des pièces massives par balayage avec la technologie CMT. (Derekar et al., 2020) comparent la porosité et la microstructure obtenues sur deux murs, l'un réalisé par balayage en MIG pulsé, l'autre réalisé en CMTP. Cependant le balayage n'est pas retenu pour la fabrication de pièces massives dans cette étude.

(Pickin et al., 2011; Rajeev et al., 2014), étudient le CMT et sa capacité à réaliser des opérations de cladding en aluminium, donc sur une seule couche. Ils regardent avec attention le taux de dilution des cordons obtenus. (Zhang et al., 2020) étudient les contraintes résiduelles obtenues sur une seule couche pour différents motifs de remplissage.

(Silva et al., 2017) réalisent des blocs en CMT en zigzag et étudient la capacité du matériau produit à être formé à froid sur des échantillons extrait de ces blocs. (Neto, 2017) réalisent des pièces massives en forme de croix en soudage CMTA ou CMTPA avec différentes stratégies de remplissage et avec des paramètres de soudage différents en fonction de la couche réalisée. (Wahsh et al., 2018) réalisent des blocs en MIG pulsé pour cinq conditions différentes ayant la même vitesse de déplacement de torche. (Haselhuhn et al., 2016) réalisent des blocs en soudage MIG avec différents alliages d'aluminium et en changeant de motif de remplissage une couche sur deux. (Miao et al., 2019) réalisent des blocs en LAHAM (WAAM + Laser) et étudient leur microstructure.

(Cong et al., 2017) réalisent des blocs en CMTP et CMTA par stratégie raster et comparent leur porosité et microstructure. Ils estiment que le mode CMTPA est trop peu énergétique pour produire des blocs en aluminium. (Liu et al., 2020) réalisent des blocs en CMTP en raster avec trois stratégies d'empilement différentes. Ils déduisent que la stratégie par inversion de sens à chaque couche est préférable. (Su et al., 2021) réalisent des blocs en CMT avec trois stratégies différentes en changeant de motif de remplissage une couche sur deux, et dans une autre étude réalisent des blocs toujours en CMT mais par décalage de contour et étudient les propriétés mécaniques obtenues.

Ainsi, les papiers qui présentent le processus de sélection de paramètres, sont orientés pour la fabrication de bloc acier ou pour la réalisation de mur fin. Seul (Quérard, 2019) détaille un processus de sélection pour la réalisation de bloc en aluminium, cependant il utilise des cordons ayant un mouillage faible qu'il compense en utilisant une stratégie de dépose continue.

La fabrication de pièces massives en aluminium avec la technologie CMTPA est relativement peu abordée dans la littérature. La justification des paramètres sélectionnés pour ce genre de réalisation l'est d'autant moins. La régularité des cordons est souvent le seul critère permettant de sélectionner une enveloppe de travail.

Dans les études mentionnées, les paramètres testés sont souvent WFS et WFS/TS ou WFS et TS. L'étude proposée au Chapitre II ajoute à WFS et WFS/TS un paramètre de contrôle de la puissance EP/EN et sélectionne également avec attention la température « d'interpass ». De plus, un ordre de dépose des cordons efficace vis-à-vis du temps de réalisation est proposée et des surépaisseurs sont choisies afin de prendre en compte les défauts géométriques éventuels.

La sélection des paramètres de cordons au Chapitre II s'appuie sur deux critères présentés section I.1.2.1, c'est-à-dire l'énergie massique, par soucis de productivité et de qualité matière, et le rapport de forme pour le mouillage.

Le Chapitre II propose d'utiliser une méthode de détermination des paramètres de fabrication de pièces massives en aluminium avec la technologie CMTPA dont la valeur n'est pas état de l'art. Puis une validation expérimentale des propositions y est menée.

I.2. Sélectionner un capteur de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM

Cette section présente à l'aide de l'état de l'art une définition de ce qu'est un capteur et la chaine de mesure dans laquelle il s'inscrit, puis liste et décrit différentes technologies de capteurs de contraintes et propose une classification en 4 familles. Enfin un état de l'art des méthodes de sélection existantes et utilisables pour sélectionner un capteur à enfouir est réalisé.

I.2.1. Définitions et détermination de catégories de capteurs pour leur insertion

De nombreuses définitions du capteur et des éléments de la chaîne de mesure existent et diffèrent en fonction des auteurs. Les définitions suivantes sont la synthèse des propositions du JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) (JCGM, 2012) et celles données par (Parmantier and Kratz, 2009a) et basées sur la CIAME (Commission Industrie-Administration pour la MEsure).

I.2.1.1. Définition d'une chaîne de mesure et d'un capteur

La chaine de mesure est l'ensemble des éléments transducteurs et organes de liaisons entre la grandeur physique à mesurer et le traitement de cette mesure. Cela inclue la visualisation, le stockage mais aussi l'utilisation de la mesure.

Une chaîne de mesure (Figure 36) est formée :

- D'une partie captation (le capteur) qui convertit le mesurande en signal électrique analogique
- D'une partie conditionnement du signal qui convertit le signal analogique en signal numérique
- D'une partie traitement qui visualise, stocke, échange, mets en réseau les données, (Karray et al., 2018) (Gupta, 2013)

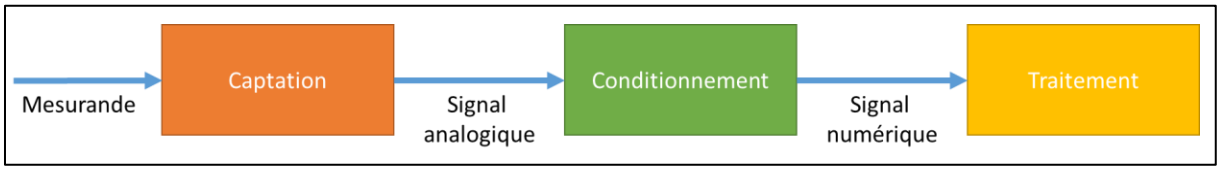


Figure 36: Chaîne de mesure

Le capteur est directement en contact avec la grandeur à mesurer (le mesurande). Par définition, il renvoie un signal électrique analogique au circuit électrique conditionneur. Certains dispositifs ne délivrant pas un signal électrique ne sont pas considérés dans cette étude comme par exemple les capteurs à fonctionnement hydraulique ou les capteurs analogiques à aiguille.

Un capteur peut être composé d'un ou plusieurs éléments permettant de transformer le mesurande en signal électrique analogique.

Lorsqu'il est composé de plusieurs éléments, le capteur réalise une transformation indirecte (colonne de gauche Figure 37). L'élément en contact avec le mesurande est appelé « corps d'épreuve ». Un corps d'épreuve transforme le mesurande en une grandeur intermédiaire non électrique. L'élément transformant la grandeur intermédiaire en grandeur électrique est appelé « transducteur ».

Lorsqu'il est composé d'un seul élément, le capteur réalise une transformation directe (colonne de droite Figure 37).

Le capteur peut agir sur un signal électrique produit par un générateur externe comme une impédance, c'est un capteur « passif » (ligne du haut Figure 37).

Sinon, le capteur peut produire le signal de mesure comme un générateur de courant ou de tension, il est « actif » (ligne du bas Figure 37).

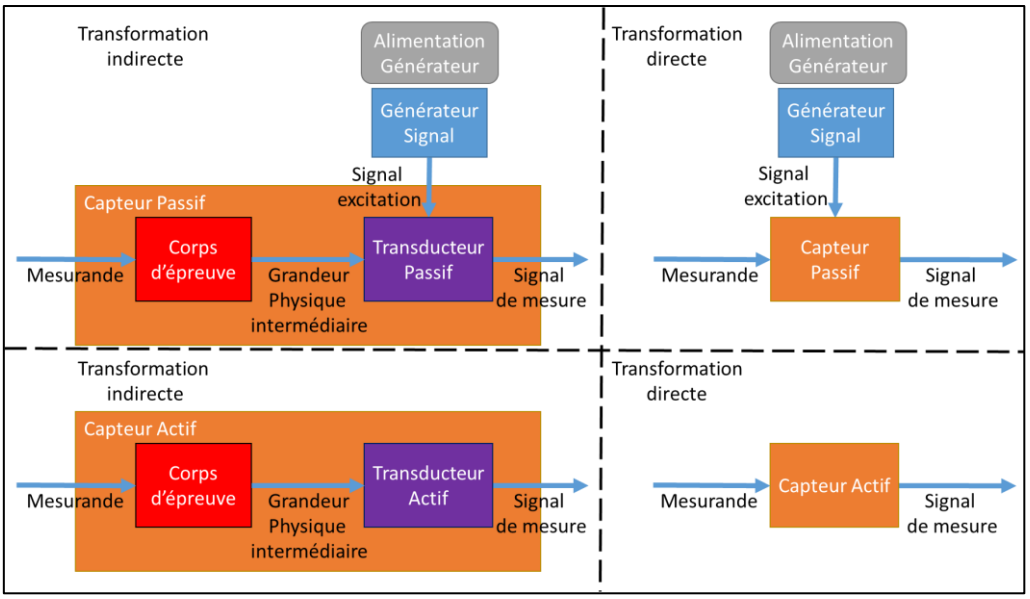


Figure 37 : Capteur actif et passif à transformation directe et indirecte

I.2.1.2. Proposition de catégories dans le cadre d'intégration de capteur au cours du procédé WAAM

Dans le cadre de la fabrication de pièces intelligentes, le capteur doit être en partie enfoui. Quatre familles de capteurs sont proposées au regard de leurs contraintes d'enfouissement (Figure 38).

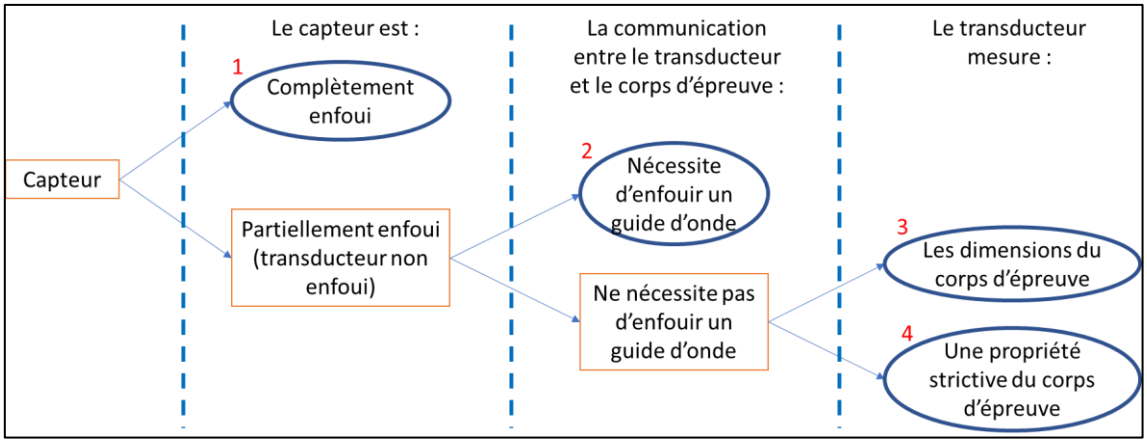


Figure 38 : Constitution des familles de capteurs pour l'enfouissement

La première catégorisation distingue les capteurs qui nécessitent d'être complètement enfouis de ceux qui peuvent n'être que partiellement enfoui. Les capteurs à transformation directe et les capteurs à transformation indirecte ayant un transducteur en contact physique avec le corps d'épreuve sont considérés dans la catégorie des capteurs complètements enfouis.

Pour les capteurs à transformation indirecte ayant un transducteur non en contact avec le corps d'épreuve, il n'est pas forcément nécessaire d'enfouir le transducteur avec le corps d'épreuve. Ces capteurs peuvent être donc seulement partiellement enfouis. Parmi ceux-ci, ceux nécessitant un guide d'onde entre le corps d'épreuve et le transducteur formeront la seconde catégorie. En effet, ce guide d'onde peut induire des contraintes d'enfouissement particulière.

Enfin, pour les capteurs à transformation indirecte ayant un transducteur non en contact avec le corps d'épreuve et ne nécessitant pas de guide d'onde, deux catégories sont distinguées en fonction de la grandeur physique intermédiaire contrôlée par le transducteur qui peut être soit :

- La forme (déformation) ou la position du corps d'épreuve (Propriété géométrique). Ce type de capteur forme la troisième catégorie.
- Une propriété intrinsèque strictive du corps d'épreuve : sa perméabilité magnétique μ, sa conductivité électrique γ… (Propriété matériau). Ce type de capteur forme la quatrième catégorie.

Ces familles sont nommées par la suite :

- Capteur complètement enfoui
- Capteur nécessitant un guide d'onde
- Transducteur mesurant une dimension
- Transducteur mesurant une propriété intrinsèque strictive

I.2.2. Classification des capteurs

Dans cette section, les principes physiques pouvant être utilisés pour chaque catégorie sont présentés. La contrainte est linéairement liée à la déformation par la loi de Hooke en élasticité. De nombreux capteurs mesurent une contrainte à travers la mesure de la déformation d'un élément et appliquent un coefficient au signal perçu pour retrouver la contrainte mesurée. C'est le cas pour de nombreuses technologies présentées par la suite.

I.2.2.1. Capteur complètement enfoui

Parmi les capteurs permettant de mesurer les contraintes dans une pièce, les capteurs qui doivent être enfouis complètement dans la pièce hôte sont les capteurs à transformation directe (pas de corps d'épreuve) et ceux ou le transducteur est en contact physique avec le corps d'épreuve.

a) Capteur Actif

Les capteurs actifs peuvent s'assimiler soit à un générateur de courant, soit à un générateur de tension (soit à un générateur de fréquence). Les capteurs actifs sont source de courant ou de tension cependant ces signaux sont généralement très faibles. Ils sont très régulièrement associés dans le circuit conditionneur à une alimentation auxiliaire permettant de réaliser une amplification du signal.

Les capteurs piézo-électriques sont des capteurs qui génèrent une intensité à partir de leur déformation. Ce sont souvent des cristaux de quartz ou des composés de lithium. Ils peuvent être utilisés conjointement avec un corps d'épreuve (Figure 39 et Figure 40) dont la géométrie et les caractéristiques matériaux sont connues et qui permet de relier la déformation mesurée localement à une contrainte subie par le corps d'épreuve.

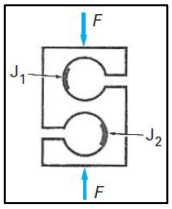


Figure 39: Corps d'épreuve pour dynamomètre en S (Parmantier and Kratz, 2009b)

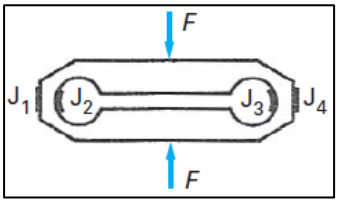


Figure 40: Corps d'épreuve pour dynamomètre en double C (Parmantier and Kratz, 2009b)

Les capteurs à effet électret sont notamment retrouvés dans les microphones et génèrent une tension image de la déformation de la membrane du micro. Il s'agit d'un condensateur dont une des armatures est la membrane mobile du micro qui est un plastique ayant naturellement une polarisation intrinsèque et qui a été métallisé.

b) Capteur Passif

Les capteurs dont la mesure de contrainte ou de déformation provient d'une variation de résistance sont nombreux. Les jauges dites de contrainte ou d'extensométrie sont un des exemples les plus connus de capteurs passifs. Ces capteurs mesurent la variation de résistance induite par la déformation géométrique d'un circuit électrique. Ils peuvent également être utilisés conjointement à un corps d'épreuve (Figure 39, Figure 40) présenté précédemment. Des jauges piézo-résistives utilisant la conductivité variable des semi-conducteurs existent également. Les potentiomètres linéaires traduisent le déplacement d'une partie mobile d'un circuit électrique (qui peut être due à une déformation) en une variation de résistance. Les transistors piézoélectriques à effet de champ (FET) peuvent également être utilisés pour mesurer une contrainte. Via la pression d'une pointe contact, la conductivité entre la source et la grille (l'émetteur et la base) est modifiée.

Les capteurs peuvent également subir une variation de capacité. Cela se traduit notamment par la variation des surfaces des électrodes d'un condensateur, par la variation de la distance entre elles ou de leur surface de recouvrement. Le matériau diélectrique présent entre les armatures du condensateur peut également être déplacé par la déformation induite par la contrainte à mesurer ou voir sa permittivité être modifiée si celle-ci est strictive.

Enfin, ils peuvent subir une variation d'induction et nécessitent donc à minima une inductance (bobine) et d'un circuit magnétique (constitué d'un potentiel noyaux et du matériau environnant). Ainsi la contrainte peut être mesurée à travers la modification d'une des caractéristiques physiques de la bobine modifiant l'inductance :

- La géométrie du bobinage : la section de l'enroulement, le nombre de spires (par torsion) ou la longueur du bobinage.
- La géométrie du noyau ou du circuit magnétique (entrefer (espace d'air) entre deux parties du circuit ou entre le circuit magnétique (ou le noyau) et un ou plusieurs bobinages).
- Sur le matériau du circuit magnétique s'il est magnétostrictif (donc sa perméabilité magnétique µ).

c) Les quartz et cordes vibrantes

Les capteurs à quartz oscillants sont une particularité. Ils peuvent être représentés comme des circuits RLC. Cependant ce sont des oscillateurs, ils génèrent un signal sinusoïdal stable à partir d'une alimentation continue. Ce signal oscille à la fréquence propre du quartz c'est-à-dire du circuit RLC équivalent. Un quartz est un élément piézo-électrique, la fréquence d'oscillation est ainsi à la fois électrique et mécanique. La fréquence d'oscillation d'un capteur à quartz peut être modifiée par la variation d'épaisseur de la lame d'air entre un quartz oscillant et l'une de ses électrodes. Il est ainsi possible de relier la variation de la fréquence d'oscillation du quartz à la déformation subie.

Les capteurs à corde vibrante utilisent également la modification d'une fréquence propre pour mesurer une déformation. Ainsi la fréquence propre d'excitation d'une corde de longueur donnée sera modifiée si elle est déformée et cela sera traduit dans l'impédance du transducteur excitant la corde.

I.2.2.2. Capteur nécessitant un guide d'onde

La seconde famille de capteurs est celle où la partie active n'est pas en contact avec le transducteur mais est relié à celui-ci par un guide d'onde. Cette famille regroupe notamment les capteurs à fibre optique.

Les capteurs à fibre optique peuvent être intrinsèques ou extrinsèques (Festinger, 2007). Dans les capteurs extrinsèques, la fibre optique ne sert que de guide d'onde et amène la lumière vers le corps d'épreuve (modulateur) qui agit sur le signal lumineux en fonction du mesurande. La fibre

optique peut aussi amener le signal vers un codeur optique. Dans les capteurs intrinsèques, au moins une partie de la fibre optique réagie à la déformation. Ces capteurs sont soit interférométriques soit distribués (réflectométries (OTDR)) soit basés sur un marquage local de la fibre (Saheb and Mekid, 2015).

Ici, seule une partie de la fibre optique peut donc être considérée comme un corps d'épreuve (la partie active réagissant au mesurande). Le reste de la fibre optique sert de guide d'onde permettant de transmettre le signal lumineux.

Pour les capteurs à guide d'onde, le corps d'épreuve et la connectique (guide d'onde) sont enfouis mais pas le transducteur permettant de traduire le signal lumineux en signal électrique.

Les capteurs à fibre optique agissent soit :

- Sur la longueur d'onde d'un signal lumineux (Fibre de Bragg)
- Sur son amplitude (Fibre à micro courbure, réflectométrie)
- Sur sa polarisation (Biréfringence)
- Sur sa phase (Interférométrie – Fibre de Fabry Pérot)
- Sur son temps de parcours (Réflectométrie – OTDR, BOTDR, ROTDR)

Le signal lumineux peut être produit par un laser hors de la pièce hôte et transmis par la fibre optique ou être généré par le témoin lui-même s'il est piézo-luminescent (luminescence induite par une déformation).

Il n'existe pas à la connaissance de l'auteur d'autres technologies existantes nécessitant un guide d'onde (non électrique) pour transmettre un champ à travers une pièce métallique.

I.2.2.3. Transducteur mesurant une dimension

La troisième famille de capteurs est celle contrôlant à distance la contrainte subie par un témoin en mesurant ses dimensions (sa forme) à travers la pièce. La déformation de celui-ci est mesurée au travers de la mesure de la taille du témoin et uniquement la taille du témoin. La contrainte subie est reliée à la déformation mesurée à partir des caractéristiques matériau du témoin.

Afin de se distinguer de la pièce hôte, il faut que le corps d'épreuve ait des propriétés distinctes de la pièce hôte détectable par le transducteur ou génère un champ détectable par le transducteur externe à la pièce. Afin de déterminer la présence d'un corps étranger dans une pièce, les technologies de contrôle non destructif sont indiquées (Dumont-Fillon, 1996). Avec une précision suffisante elles permettent de recréer par imagerie le corps inséré et ainsi de le mesurer. Basées sur différents principes physiques, ces inspections peuvent être :

- Ultrasonore (Figure 41)
- Thermique (Figure 42)
- Irradiante (Figure 43)
- Electromagnétique (Figure 44)

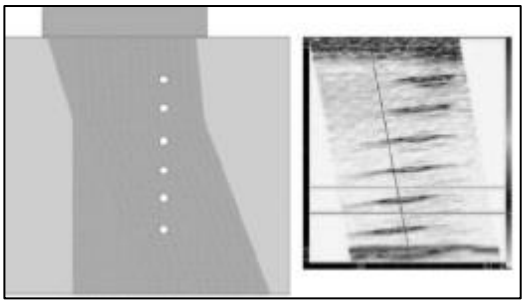


Figure 41 : Imagerie par Sonde Ultrasonore Multiéléments (Bacelar, 2017)

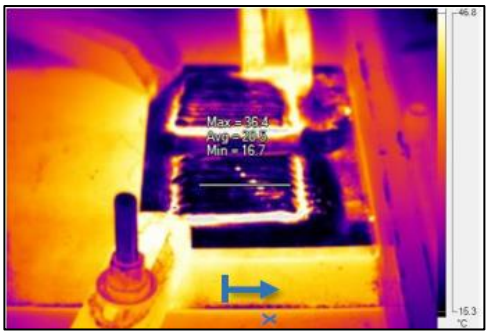


Figure 42 : Imagerie par thermographie (Bacelar, 2017)

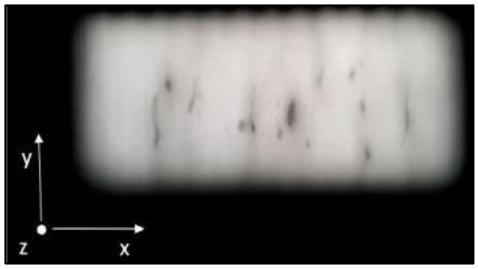


Figure 43 : Imagerie par radiographie (Lopez et al., 2018)

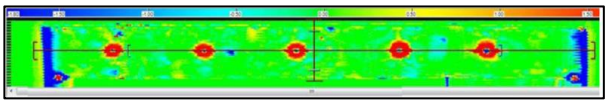


Figure 44 : Imagerie par réseau de sondes à courants de Foucault (Chauveau, 2018)

a) Inspection Ultrasonore

L'inspection ultrasonore permet de générer des ondes mécaniques dans la pièce hôte et de repérer la présence d'un corps d'épreuve via l'analyse des échos perçus. Avec un réseau de capteurs, il est possible de déterminer la taille du témoin et donc sa déformation. Pour être repérable le témoin doit avoir une impédance acoustique différente de la pièce hôte (module d'Young, coefficient de poisson, masse volumique). Afin de mettre en vibration la pièce et de recevoir les échos plusieurs technologies existent :

- Les palpeurs piézo-électriques :

  Ils permettent de transcrire les vibrations acoustiques en signal électrique (et vice-versa).

- Les lasers et les interféromètres optiques :

Le laser permet de chauffer localement la pièce et par dilatation de créer une onde acoustique. S'il est suffisamment énergétique, le laser peut également créer par ablation locale de la matière (par évaporation), une onde mécanique due aux forces de recul. L'onde réfléchie peut être mesurée à l'aide d'un interféromètre de haute résolution. Ce type de technologie est utilisé en laboratoire et non en industrie due à son coût et à sa difficulté de mise en œuvre (Chauveau, 2018).

- Les technologies EMA (électro-magnéto-acoustiques)

Une bobine permet de créer des courants de Foucault alternatif et donc des vibrations dans la pièce hôte due aux forces de Laplace générées. Les ondes réfléchies affectent les courants de Foucault ce qui peut être retranscrit dans l'induction de la bobine génératrice. Les ondes peuvent aussi être créées si la pièce est magnétostrictive, les vibrations se retranscrivent sur l'inductance de la bobine génératrice.

b) Inspection thermique

Il est possible de repérer un corps d'épreuve enfoui ayant un coefficient calorimétrique ou thermoélastique différent de la pièce hôte en chauffant la pièce et en observant la différence de refroidissement par thermographie. Il faut que le corps d'épreuve soit proche de la surface pour, que

la température du corps d'épreuve affecte la température de la zone le recouvrant et que la différence de refroidissement dans cette zone soit ainsi visible par caméra infrarouge (par exemple). Cela est également possible si le témoin émet ou absorbe de la chaleur.

c) Inspection irradiante

Un corps d'épreuve enfoui peut également être observé s'il a un coefficient d'absorption différent de la pièce hôte. Ainsi en inspectant la pièce hôte à l'aide de rayons ionisants (rayon X, gamma, neutrons…) il est possible de détecter et de mesurer le témoin enfoui. Cela est également possible si le témoin émet des rayons ionisants.

d) Inspection électromagnétique

Il est enfin possible de mesurer des dimensions du corps d'épreuve et donc la déformation qu'il subit s'il a des propriétés électromagnétiques différentes de la pièce hôte (perméabilité magnétique, permittivité diélectrique, conductivité électrique). Ainsi en inspectant la pièce hôte à l'aide d'une sonde à courants de Foucault par exemple, il est possible de détecter et de mesurer le témoin enfoui. La mesure peut aussi être réalisée si le corps d'épreuve émet un champ magnétique.

I.2.2.4. Transducteur mesurant une propriété intrinsèque strictive

La dernière famille de capteurs proposée est celle contrôlant à distance une propriété d'un témoin, la grandeur intermédiaire est une propriété du témoin qui n'est pas sa forme. Cela implique que le transducteur est en dehors de la pièce et interroge le témoin à distance à travers la pièce.

Il est préférable de n'avoir à enfouir que l'élément qui réagit à la grandeur mesurée, c'est-à-dire le corps d'épreuve. Le corps d'épreuve doit donc pouvoir se distinguer de la pièce hôte une fois enfoui et le transducteur doit pouvoir réagir à la modification du corps d'épreuve à distance et à travers le matériau de la pièce hôte. L'enjeu est donc que le transducteur puisse réaliser une mesure sans contact :

- Soit d'une propriété matériau strictive du corps d'épreuve
- Soit d'une caractéristique du corps d'épreuve en lien avec sa géométrie
- Soit d'un champ strictif généré par le témoin

Afin de détecter un changement de caractéristique intrinsèque du témoin à travers la pièce, le transducteur utilisé peut :

- Générer une densité de courant
- Générer un champ électromagnétique
- Générer un champ non électromagnétique
- Réagir à un champ strictif généré par le témoin

a) Le transducteur génère une densité de courant traversant le témoin :

Le corps d'épreuve enfoui doit avoir une conductivité différente de la pièce hôte. Pour générer et contrôler un courant dans la pièce et mesurer une variation de résistance, il est possible d'utiliser :

- La mesure de chute de potentiel par méthode des 4 pointes (DC ou AC) (voir section III.3.4.1)
- La mesure par courants de Foucault (généré à l'endroit du témoin)

La contrainte subie par la pièce agit sur le témoin et le déforme. Cela induit une modification de la résistance mesurée dans la zone traversée par les courants générés dans la pièce, via :

- La modification de la taille du témoin
- La modification de la conductivité du témoin (si le matériau a une conductivité strictive)

Si la conductivité du témoin est plus grande que celle de la pièce hôte, alors lorsque le témoin s'agrandit, la résistance globale baisse car la conductivité moyenne (de la zone traversée par les courants) augmente.

La variation de résistance est traduite dans l'inductance de la bobine génératrice pour les courants de Foucault. Elle est mesurée directement par la méthode des 4 pointes. Ces deux méthodes présentées ont une profondeur d'interrogation limitée.

Pour ces méthodes, bien que la grandeur intermédiaire soit électrique, il a été décidé de les classer dans cette catégorie du fait de l'absence de liaison électrique enfouie.

b) Le transducteur génère un champ électromagnétique traversant le témoin :

L'étude se concentre sur les pièces métalliques donc conductrices. D'après les équations de Maxwell, il n'est pas possible de générer un champ électrique dans une pièce conductrice donc l'usage de champ électrique n'est pas étudié.

Lorsqu'une bobine est alimentée par un courant alternatif, elle crée un champ magnétique B alternatif. L'inductance de cette bobine traduit sa capacité à créer un flux magnétique. En agissant sur le flux magnétique créé par la bobine, il est possible de modifier son inductance et donc son impédance. Les lignes de champs créées vont dépendre de la perméabilité magnétique des matériaux baignés par le champ et rediriger le flux magnétique créé.

Le corps d'épreuve enfoui peut donc par exemple avoir une perméabilité forte et la pièce hôte une perméabilité faible. Ainsi, il est possible de détecter le corps d'épreuve dans la pièce par induction, si le champ magnétique créé est suffisamment fort et les lignes de champ magnétique pénètrent la pièce hôte et le témoin. Si la perméabilité magnétique du corps d'épreuve enfoui varie avec sa déformation alors il est magnétostrictif et il est donc possible de mesurer la contrainte subie par la pièce à travers la variation de perméabilité du témoin qui se traduit par une variation d'impédance de la bobine interrogatrice.

c) Le transducteur génère un champ non électromagnétique

Les autres champs qui peuvent être générés ont déjà été abordés dans la famille précédente (rayons ionisants, température, déformation). Si une propriété intrinsèque du corps d'épreuve mesurable par un de ses champs est strictive, alors son contrôle par un transducteur externe à la pièce peut être classifié ici.

Dans le cas d'une inspection ultrasonore, si les propriétés telles que le module de Young, le coefficient de Poisson et/ou la masse volumique du témoin sont strictifs, la déformation du témoin peut être mesurée.

d) Le transducteur réagit à un champ strictif créé par le témoin

Si un témoin enfoui génère un champ (rayons ionisants, champ thermique, champ électromagnétique) détectable par un transducteur externe à la pièce et que ce champ est strictif, alors cette technologie appartient à cette famille.

I.2.3. Méthodes de sélection de capteur

De nombreux critères sont à prendre en considération lors du choix d'un capteur, par exemple : le coût, l'encombrement, la précision … Afin de choisir un capteur pour un usage donné, il est nécessaire de réaliser un choix multicritère. De nombreux outils d'aide à la décision existent. Ces outils se basent sur des connaissances de recherche opérationnelle. Les méthodes mathématiques d'aide à la décision multicritères peuvent être regroupées en différentes approches (Lehoux and

Vallée, 2004) ; (Mena, 2000). Celles par agrégation complète et par agrégation partielle sont présentées plus en détail.

I.2.3.1. Méthode par agrégation complète

a) Somme pondérée (Weight Sum Method WSM)

Pour cette méthode, il s'agit de réaliser une somme pondérée :

- Une liste des critères d'évaluation des technologies est établie
- Un poids est attribué pour chaque critère
- Ces poids sont normalisés par rapport à la somme des poids des critères (facultatif)
- Une solution est évaluée critère par critère en lui donnant un score
- Ces scores sont normalisés par rapport à la somme des scores de la solution sur chaque critère (facultatif)
- Pour chaque critère, le score normalisé d'une solution est multiplié par le poids normalisée du critère
- Une somme des scores normalisés pondérés est ensuite réalisée

La solution ayant le score le plus élevé est sélectionnée.

Avec cette méthode, il n'y a pas de critère rédhibitoire, une solution avec un très bon score et un très mauvais score sur deux critères différents peut être préférée à une solution moyenne.

b) Produit pondéré (Weight Product Method WPM)

Cette méthode consiste, pour une solution, à multiplier entre eux les scores pondérés obtenus à chaque critère. Cette méthode pénalise fortement les solutions ayant un mauvais score sur un critère.

c) Analyse Multicritères Hiérarchique AMCH (Analytic Hierarchy Process AHP)

Cette méthode développée par (Saaty, 1988) se décompose ainsi :

- Des critères et sous-critères sont définis (décomposition hiérarchique du problème)
- Une analyse 2 à 2 du degré d'importance des critères et sous-critères pour créer une matrice de comparaison est réalisée
- Le poids normalisé de chaque critère et sous-critère est calculé (division par la somme des colonnes puis par la somme des lignes)
- La cohérence des poids des critères est vérifiée (si C1 > C2 > C3 alors C3>C1 n'est pas possible) à l'aide d'un calcul de ratio de cohérence non détaillé ici mais qui doit être inférieur à 10 %
- Les poids des sous-critères sont pondérés par les poids des critères supérieurs
- Pour chaque critère, le sous critère ayant le poids pondéré le plus fort est sélectionné
- Pour chaque sous critère une comparaison 2 à 2 des solutions proposées est réalisée et une matrice de comparaison est réalisée et la cohérence des scores est vérifiée
- Les poids des sous critères préférentiels sont multipliés avec le score réalisé pour chacun des sous-critères de la solution évaluée
- Ces produits sont additionnés pour obtenir un score global pour une technologie donnée

La solution ayant le score le plus élevé est sélectionnée.

Cette méthode permet de comparer toutes les solutions 2 à 2 suivant chaque critère. Elle impose de bien définir le problème et d'en réaliser une décomposition hiérarchique. Elle peut être cependant fastidieuse à mettre en place. Elle est très populaire et fait l'objet de débat en recherche opérationnelle (Munier and Hontoria, 2021).

I.2.3.2. Méthode par agrégation partielle

Les méthodes ELECTRE (Roy and Skalka, 1987), PROMETHEE ou MELCHIOR sont des méthodes d'agrégation partielle se basant sur l'analyse de graphes orientés et sur le principe de sur-classement. Elles permettent de dégager un sous-ensemble de solutions souhaitables. La transitivité n'est pas forcément respectée dans ces méthodes (il est possible d'avoir C1>C2 ; C2>C3 et C3>C1) car les divers critères ne sont pas forcément comparables entre eux. La méthode Electre se décompose ainsi :

- Des critères sont définis avec une échelle de notation
- Des poids sont attribués à chaque critère
- Les solutions à évaluer sont notées pour chaque critère sur leur échelle de notation
- Des indices de concordance de sur-classement d'une solution par rapport à une autre sont calculés
    - Somme des poids normalisés des critères pour lesquelles la technologie considérée est mieux notée que l'autre
- Des indices de discordance de sur-classement d'une solution par rapport à une autre sont calculés
    - Ecart de notation le plus grand pour lequel une technologie est surclassée par une autre sur un critère, divisée par l'amplitude de l'échelle de notation la plus grande
- Un seuil minimal de concordance de sur-classement et un seuil maximal de discordance de sur-classement sont choisis
- Les solutions qui ont un indice de concordance de sur-classement supérieur au seuil minimal et ont un indice de discordance de sur-classement inférieur au seuil maximal par rapport à une autre la surclasse
- Un unique seuil minimal de sur-classement peut être choisi. L'indice de concordance est alors multiplié par un moins l'indice de discordance. L'indice calculé est comparé à ce seuil. Si l'indice de sur-classement d'une solution par rapport à une autre qui a été calculé est supérieur au seuil fixé alors la solution considérée surclasse l'autre.

Cette méthode se base sur deux principes, il faut qu'une solution en surclasse une autre sur une majorité des critères, et il faut qu'elle ne soit pas largement surclassée par l'autre solution sur un critère. Cette méthode permet de comparer diverses solutions 2 à 2. Elle ne permet pas forcément d'obtenir une meilleure solution mais permet de dégager un sous ensemble de solutions préférables et d'éliminer certaines solutions nettement surclassées.

I.2.3.3. Résumé des avantages et inconvénients de chaque méthode

Les caractéristiques principales des méthodes présentées sont résumées Tableau 4:

Tableau 4: Méthodes d'évaluations et caractéristiques

Méthode	**Caractéristiques principales**
WSM	Si une solution est mauvaise sur un critère, d'autres critères peuvent compenser Nécessite une pondération des critères
WPM	Si une solution est mauvaise sur un critère, la solution est très fortement pénalisée Nécessite une pondération des critères
AHP	Ne considère que les sous-critères les plus pondérés pour calculer le score final Nécessite une hiérarchisation en critère et sous-critère
Electre	Permet de dégager un sous ensemble de solution / d'éliminer les solutions Pas de pondération ou hiérarchisation nécessaire

Des capteurs de chaque famille sont présentés plus en détail dans le Chapitre III dans lequel leur capacité à être insérée au cours du procédé WAAM est évaluée à l'aide d'un guide basé sur une des méthodes qui vient d'être présentée.

I.3. Rendre fabricable la pièce intelligente avec la technologie de mesure sélectionnée

La technologie qui est investiguée pour la réalisation de pièces intelligentes est le contrôle par induction de la perméabilité d'un témoin magnétostrictif enfoui dans une pièce amagnétique. Le capteur se compose d'une sonde de mesure développée par le laboratoire TIMA et d'un témoin ferromagnétique d'épaisseur inférieure à un millimètre ayant le rôle de corps d'épreuve (Ricart et al., 2021). La cellule WAAM utilisée impose la soudure CMT comme moyen d'insertion avec la pièce WAAM aluminium en cours de réalisation. L'enjeu est donc de pouvoir insérer un témoin fin en acier dans une pièce massive en aluminium en utilisant la technologie de soudure CMT.

I.3.1. Etat de l'art sur l'enfouissement d'inserts dans un procédé de fabrication additive

Il convient en premier lieu de définir l'insertion qui doit être réalisée. L'enjeu est d'enfouir un corps dans une pièce hôte au cours de son procédé de fabrication. Le corps enfoui ne peut pas être extrait de la pièce hôte sans l'endommager. La majorité des surfaces du corps doit être recouverte par la pièce hôte. La pièce hôte est plus volumineuse que le corps inséré. Selon (Lehmhus et al., 2016), il s'agit d'une intégration volumique.

Différents leviers d'actions ressortent de la bibliographie, lorsqu'un insert est intégré au cours du processus de fabrication additif d'une pièce :

- Actions sur la conception de l'insert
- Actions sur la conception de la pièce hôte
- Actions lors du procédé de fabrication

I.3.1.1. L'insert

Une des premières actions consiste à adapter l'insert à la pièce dans laquelle il doit être intégré ainsi qu'au procédé de fabrication utilisé.

Si le procédé de fabrication additive peut endommager l'insert alors il est nécessaire de le protéger avec des couches ou des revêtements adaptés. Cet aspect est abordé au Chapitre III car la protection à réaliser dépend autant de la technologie de fabrication additive que de l'insert à protéger.

Il peut également être nécessaire d'adapter la géométrie de l'insert. Il peut être reconçu pour être adapté à la géométrie de la pièce en cours de réalisation, pour faciliter son insertion/positionnement dans le procédé de fabrication, pour maximiser/minimiser son interaction avec le procédé de fabrication ou enfin pour être fonctionnel une fois inséré dans la pièce. (Hossain et al., 2016) enfouissent au cours du procédé de fabrication EBM un insert protégé par une coque ayant une géométrie qui permet son branchement (câblage) une fois la pièce réalisée et l'insert complètement enfoui.

Certains procédés type powder-bed et SLA nécessitent une surface plane sur laquelle déposer la matière. Pour enfouir un insert qui ne présente pas de surface plane, il faut d'abord le loger dans une contre-forme réalisée en avance (Figure 45). La contre-forme peut être divisée en plusieurs parties pour permettre le logement de l'insert dans celle-ci. La contre-forme est enfouie avec l'insert dans la pièce finale. Il peut être aussi nécessaire de diviser l'insert en plusieurs parties pour permettre son insertion dans un substrat ou dans une contre-forme (Kataria and Rosen, 2001). Enfin un simple chapeau permettant de maintenir le capteur (Hossain et al., 2016) ou l'actionneur (Mayer et al., 2016) à distance du procédé peut être ajouté par-dessus l'insert (le capteur ou l'actionneur).

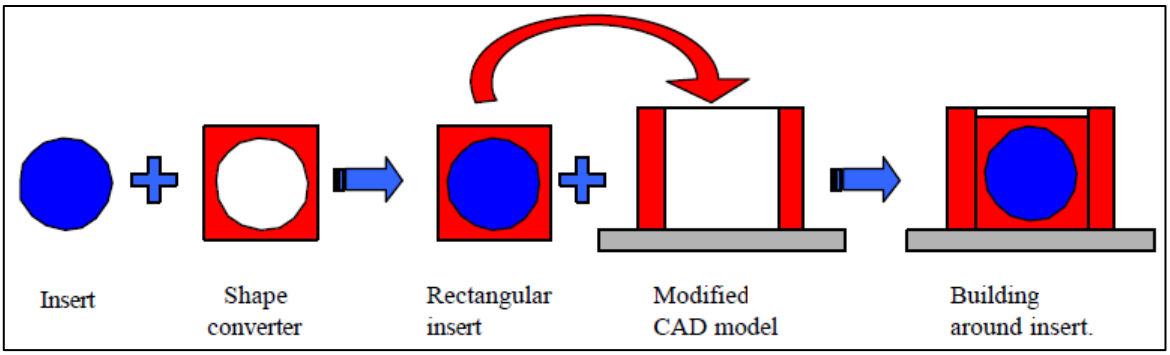


Figure 45 : Utilisation de contre-forme (Shape converter) pour un procédé SLA (Kataria and Rosen, 2001)

I.3.1.2. La pièce hôte

Le second levier consiste à adapter la pièce hôte dans laquelle l'insert est intégré. La pièce peut donc être reconçue afin de prendre en compte l'espace nécessaire occupé par l'insert (Yuen, 2016). L'espace laissé peut également être conçu plus grand que la taille de l'insert :

- Pour éloigner l'insert des conditions hostiles imposées par le procédé de fabrication (Petrat et al., 2018)
- Pour que l'insert puisse réaliser sa fonction principale (par exemple dans le cas d'un actionneur)

La pièce peut être reconçue localement ou globalement avec un matériau différent qui permet de diminuer les contraintes du procédé de fabrication sur l'insert ou qui permet à l'insert d'être fonctionnel.

La pièce peut être reconçue pour intégrer un logement qui sera réalisé après une première phase de fabrication additive, par un procédé soustractif. Par exemple (Javadi et al., 2019b) réalisent des perçages entre deux couches d'un mur WAAM afin de pouvoir y insérer des billes de tungstène.

Enfin, il est également possible de ne pas réaliser d'adaptation si l'insert est peu volumineux au regard de la taille des couches réalisées (Yuen, 2016). Dans ces cas-là, l'enjeu principal est que la présence de l'insert dans la zone de travail n'entraine pas d'arrêt inopiné de la fabrication ou ne rende pas la pièce hôte ou l'insert défectueux. Cela peut, par exemple, être occasionné par la collision de la pièce ou de l'insert avec l'outil de dépose ou par l'accumulation de défaut géométrique dans la pièce hôte à cause de l'insert.

I.3.1.3. Le procédé de fabrication

Enfin, le dernier levier consiste à agir sur le procédé de fabrication pour permettre l'intégration correcte de l'insert dans la pièce. La sensibilité de l'insert au procédé de fabrication ainsi que sa place dans la pièce hôte ont un impact sur la fabrication de celle-ci. La présence de l'insert dans la zone de travail à un moment de la fabrication de la pièce est inévitable. L'enjeu est donc d'adapter le procédé de fabrication au voisinage du témoin mais aussi de réaliser la mise en position et le maintien en position de l'insert lors de la fabrication.

Si un logement a été prévu dans le substrat, l'insert est positionné dès le départ de la fabrication puis enfoui. Aucun arrêt de fabrication n'est a priori nécessaire et l'insertion est réalisée en une seule phase.

Une autre possibilité est de commencer la fabrication directement sur l'insert. Puis de retourner celui-ci pour accéder aux dernières faces à enfouir.

Enfin, il est possible de réaliser une première partie de la pièce intégrant le logement de l'insert, arrêter le procédé de fabrication pour placer l'insert et rependre la fabrication pour finir l'insertion avec la même technologie (Töppel et al., 2018) ou une différente (Petrat et al., 2018).

Lorsque l'insertion est réalisée en plusieurs phases, pour certains procédés (EBM, SLA), l'utilisation de masques est nécessaire. Un masque est un négatif de l'élément positionné dans la zone de fabrication, de même hauteur que celui-ci. Il permet d'assurer une surface de départ plane (Figure 46) et d'assister le positionnement de l'élément dans la zone de fabrication (Hossain et al., 2016). L'élément en question contient l'insert, et peut donc être considéré comme un substrat ou comme la première partie de la pièce. Le positionnement de cet élément et du masque dans la zone de travail doit cependant être fait avec précision et peut être aidé par des outils de mesure précis (caméra, laser) (Hossain et al., 2018). Le masque est enlevé à la fin de l'insertion, il ne fait pas partie de la pièce finale.

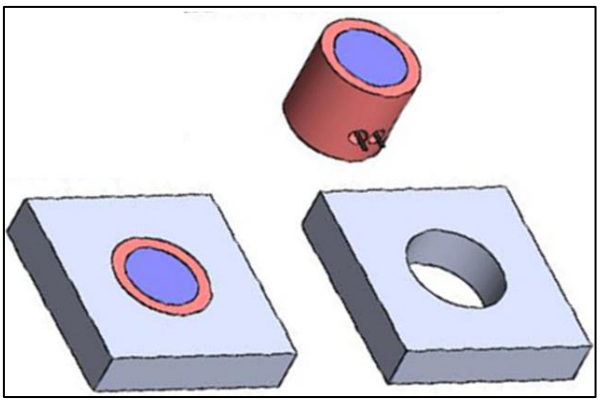


Figure 46: Masque (gris) permettant de recouvrir le reste de la zone de travail autour de l'insert en EBM (Hossain et al., 2016)

Le maintien en position de l'insert dans la zone de travail peut être réalisé avec de la colle (Yuen, 2016), avec des aimants, ou avec des brides. L'enjeu est que ce maintien ne provoque pas de collisions ou de malfaçons et il faut potentiellement adapter la dépose en prenant en compte ce maintien. C'est-à-dire arrêter la fabrication pour déplacer des brides ou adapter la trajectoire permettant le recouvrement de l'insert en prenant en compte l'emplacement des brides.

Le choix des trajectoires de fabrication peut se faire de manière à déposer volontairement sur l'insert ou au contraire de manière à l'éviter. Ainsi le slicing 3D peut permettre de changer la direction principale d'empilement des couches de manière à ne pas déposer sur l'insert. Les trajectoires 5 axes peuvent faciliter la dépose perpendiculaire à la surface de l'insert. Elles peuvent permettre également de plus facilement déposer autour de l'insert sans l'endommager ou sans risque de collisions de l'outil (Song et al., 2015). L'ordre de déposition des couches est par exemple optimisé par (Grandal et al., 2017) pour minimiser les contraintes sur la fibre optique enfouie.

Un autre levier consiste à adapter localement les paramètres de fabrication. Cette adaptation peut être faite dans le but de rendre le procédé moins hostile pour l'insert ou dans le but d'améliorer l'adhésion de l'insert avec la pièce. Par exemple, (Mayer et al., 2016) adaptent le temps entre deux cycles de lasage au voisinage de l'insert afin de limiter la température vue par celui-ci en dessous de 200 °C. Ils utilisent également un cycle de préchauffe afin de créer une précontrainte sur l'actionneur enfoui.

La technologie de mesure étudiée impose l'insertion d'un témoin en acier très fin dans la réalisation d'une pièce aluminium par procédé WAAM. Le témoin en acier doit servir de témoin de déformation, donc le témoin doit être lié avec la pièce hôte. Le substrat ne peut donc pas servir de logement pour le témoin car ce dernier doit être complètement lié à la pièce. Les enjeux se porteront

donc sur la préparation du témoin, sur son positionnement et son maintien ainsi que sur l'adaptation de la stratégie de fabrication.

I.3.2. Etat de l'art de la soudure aluminium-acier

Afin d'insérer le témoin en acier dans la pièce en aluminium, il est nécessaire de souder ensemble ces deux pièces. Souder à l'arc de l'acier à de l'aluminium est une tâche complexe. Ces deux matériaux sont naturellement peu miscibles l'un dans l'autre car leurs propriétés thermo-physiques sont très différentes. La solubilité du fer dans l'aluminium en phase solide est notamment très faible (Wang et al., 2016). Le soudage à l'arc de l'un à l'autre entraine des soudures de pauvre qualité mécanique et de nombreuses projections.

Une des approches pour lier ensemble ces deux matériaux est d'utiliser une pièce de transition bimétallique acier-aluminium (ESAB, 2017) réalisée par une autre technique d'assemblage et de souder ensemble les éléments acier et aluminium à leur partie respective de la pièce bimétallique (Figure 47 ci-dessous). Cependant cette approche ne correspond pas à l'approche qui est abordée dans cette thèse car l'acier doit être complètement enfoui dans de l'aluminium et cela revient à déporter le problème vers la réalisation de la pièce de transition.

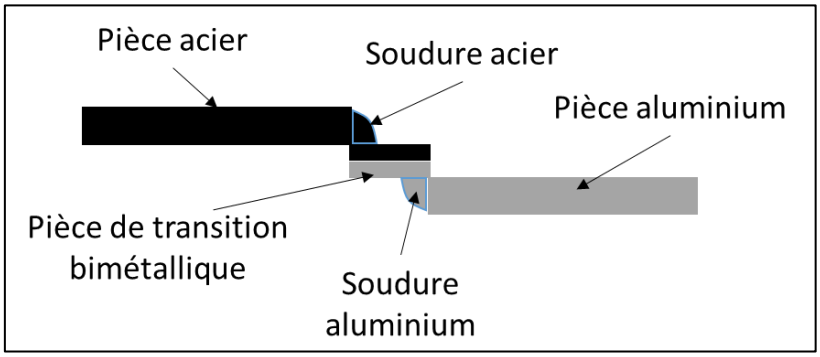


Figure 47: Assemblage aluminium-acier par pièce de transition bimétallique

La seconde approche permettant de souder de l'acier avec de l'aluminium consiste à utiliser un revêtement sur l'acier permettant d'améliorer la mouillabilité de l'aluminium avec celui-ci.

A l'interface entre l'acier et l'aluminium, une couche bimétallique Fe_xAl_y se forme. Cette couche est essentielle à la tenue mécanique de la liaison et est la résultante de la soudure de l'acier avec l'aluminium (Basak et al., 2016), (Singh et al., 2019). Les divers composés pouvant être formés dépendent fortement de la technologie d'assemblage et des cycles thermiques imposés lors du processus. Ainsi lorsque l'aluminium est majoritaire, des composés Fe_2Al_5 ou $FeAl_3$ (ou Fe_4Al_{13} qui est un composé proche de $FeAl_3$) forment une interface bimétallique sur une certaine épaisseur entre l'aluminium et l'acier (Agudo et al., 2007), (Singh et al., 2019). Les composés Fe_2Al_5 se situent plutôt à l'interface avec l'acier alors que les $FeAl_3$ se situent à l'interface avec l'aluminium (Kumar et al., 2022). L'épaisseur de cette couche bimétallique joue un rôle crucial sur le contrôle de la qualité mécanique de la liaison réalisée. En effet, les composés produits ont un caractère fragile et une épaisseur de la couche intermétallique supérieure à 10µm peut conduire à un appauvrissement des propriétés mécanique de la liaison (Jácome et al., 2009).

Divers paramètres permettent de contrôler l'épaisseur de cette couche et notamment (Singh et al., 2019) :

- Les éléments additionnels présents dans le fil d'apport en alliage d'aluminium
- Le revêtement de l'acier
- L'apport énergétique
- La position de la torche

Certains éléments présents dans l'aluminium viennent accélérer la croissance de la couche intermétallique et d'autre la ralentir. Le silicium, par exemple limite la croissance de la couche intermétallique et est conseillé pour souder l'aluminium à l'acier (Shi et al., 2013). Son effet est décuplé lorsqu'il est couplé avec du manganèse (Milani et al., 2016). Cependant l'ajout de silicium tend à rendre la couche intermétallique plus fragile (Singh et al., 2019); (Niu et al., 2016); (Milani et al., 2016). Certains éléments n'apportent rien comme le magnésium par exemple (Shi et al., 2013).

Plusieurs types de revêtement peuvent être utilisés (Norme EN 1036). Le revêtement appliqué à l'acier, généralement du zinc, joue un rôle important lors de la soudure. Les principaux procédés d'application du zinc sur l'acier sont :

- La galvanisation : le zinc est appliqué à l'acier par immersion/trempage à chaud.
- L'électro-zingage : déposition électrolytique de zinc (parfois appelé galvanisation à froid).

L'ajout de zinc permet d'améliorer le mouillage de l'aluminium sur l'acier et ralentir la croissance de la couche intermétallique. Cependant les fumées de zinc produites lors de son évaporation viennent perturber l'arc de soudure et peuvent provoquer de nombreuses porosités dans la soudure (Jin et al., 2018; Singh et al., 2019). De plus, des dépôts de zinc fragiles peuvent se créer au pied du cordon de soudure venant fragiliser la liaison. Il est ainsi important de contrôler l'épaisseur du revêtement en zinc afin de limiter ces effets indésirables (Yagati et al., 2014), (Agudo et al., 2007).

Enfin, l'apport énergétique produit par la soudure est un élément important venant alimenter la croissance de la couche intermétallique (Cao et al., 2013). Le CMT est une technologie de soudure recommandée pour la soudure aluminium acier de par sa capacité à souder à faible énergie, (Singh et al., 2019), (Furukawa, 2006). (Kumar et al., 2022) analysent les quatre modes CMT présentés section I.1.1 pour la réalisation de soudure aluminium-acier et montrent que ceux ayant le plus fort apport énergétique ont les moins bonnes caractéristiques mécaniques. Cependant, augmenter l'apport énergétique lors de la soudure permet également d'accroître la fluidité du bain de soudure et ainsi d'améliorer le mouillage et d'agrandir la surface de contact de l'aluminium sur l'acier. Le contrôle de l'apport énergétique lors de la soudure est donc essentiel. La préchauffe d'une des deux pièces peut permettre d'accroitre la fluidité du bain sans augmenter l'énergie apportée par la soudure. L'adjonction d'une masselotte servant de puit thermique peut également réduire l'énergie vue par la couche intermétallique (Borrisutthekul et al., 2007). Ainsi la croissance de celle-ci est limitée tout en gardant un bon mouillage de l'aluminium sur l'acier. L'apport énergétique de la soudure CMTPA est optimisée pour l'insertion d'un témoin au Chapitre IV.

Diriger l'apport de chaleur par la position de la torche est le dernier paramètre clé venant influencer la tenue mécanique de la liaison. Ce paramètre est investigué au Chapitre IV afin de trouver la configuration permettant l'enfouissement sain du témoin de déformation.

I.3.3. Etat de l'art soudure fin-épais

Le second enjeu qui est adressé est la soudure d'un élément très fin, dans une pièce massive. L'enjeu autour de l'énergie de soudure est important.

- Le cordon peut être produit avec suffisamment d'énergie pour être mouillé avec le reste de la pièce, mais produit avec beaucoup trop d'énergie pour le témoin et ainsi le détériorer.
- A l'inverse, le cordon de soudure produit peut avoir une liaison de qualité avec le témoin mais ne pas être suffisamment énergétique pour se lier à la pièce massive.

De manière générale, il est conseillé d'utiliser un fil ayant un diamètre plus faible que l'épaisseur des pièces à souder (Young, 2020). L'arc électrique doit donc faire fondre le fil complètement mais pas les pièces à souder pour les lier ensemble. S'ils sont de mêmes dimensions et de même matériau, la tâche est complexe. Pour venir résoudre cette problématique, deux axes de solutions apparaissent :

- Si l'énergie est calibrée sur la pièce massive ; elle est trop importante pour le témoin fin ; il faut donc réduire l'énergie vue par le témoin. Cela peut se faire de plusieurs manières :
    - Diriger l'arc de soudure principalement vers la pièce massive et l'éloigner du témoin fin (longevity-inc.com, 2019)
    - Discrétiser la soudure pour éviter l'accumulation de chaleur du témoin (soudage pulsé ou en plusieurs passes) (weldersmanual.com, 2021)
    - Améliorer l'évacuation de l'énergie de soudure absorbée par le témoin en lui accolant un échangeur de chaleur (masselotte en cuivre ou aluminium) (Chabenat, 2000)
    - Utiliser une soudure où le fil est l'électrode positive qui concentre l'énergie de soudure sur le fil d'apport plutôt que sur le matériau de base (Young, 2020)
- Si l'énergie est calibrée sur le témoin fin ; elle est trop faible pour que le cordon se lie à la pièce massive ; il faut donc :
    - Soit amincir la pièce massive localement, en réalisant des chanfreins ou en réalisant des lèvres pour les soudures en T (Michel, 2017)
    - Soit augmenter l'énergie vue par la pièce massive, en préchauffant la pièce massive (CEMEQ and CSMOFMI, 2010)

La technologie CMT a montré sa capabilité à souder des tôles très fines de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur (Furukawa, 2006).

Le fil qui est utilisé par la suite est plus épais que le témoin, cela va à l'encontre des recommandations faites pour deux matériaux identiques, cependant le témoin est en acier et le fil en aluminium. Le diamètre de fil est, de plus, imposé pour avoir une meilleure efficacité lors de la fabrication d'une pièce massive. Enfin, le substrat n'est pas chanfreiné ou modifié pour rapprocher son épaisseur de celle du témoin. Il est nécessaire de garder un substrat épais pour diminuer les déformations induites lorsqu'une pièce massive est réalisée.

L'usage de la technologie CMT, d'un plateau chauffant et de masselottes améliorant l'évacuation électrique et thermique est choisi dans les expériences présentées Chapitre IV.

I.3.4. L'analyse par tomographie d'une liaison acier / aluminium

Les méthodes permettant l'insertion d'un témoin ont été présentées. Afin de valider leur efficacité il est nécessaire de caractériser la liaison obtenue. La tomographie à rayons X permet d'obtenir une cartographie de l'absorbance d'un échantillon (Thiery, 2015). Elle est aussi connue sous le nom de CT-scan (Computed Tomography scan). Un échantillon est présenté devant un scanner à rayons X et plusieurs images sont réalisées pour différents angles de vue. Ainsi le volume de l'échantillon est reconstruit en millions de voxels, chacun associé à une valeur d'absorbance. La taille du voxel est définie en fonction de la résolution du tomographe, de la taille de l'échantillon et de la nature de l'échantillon. Un élément lourd a une plus forte absorbance des rayons X qu'un élément léger. Ainsi il est possible de distinguer un volume d'acier, d'un volume d'aluminium, d'un volume de vide qui ont une forte absorbance, une faible absorbance ou une absorbance nulle et apparaîtront à l'image comme une zone blanche ; grise ou noire. Ces millions de voxels se présentent par défaut comme un stack d'images de l'échantillon orienté suivant une vue. Chaque image représente ainsi l'échantillon à une certaine profondeur. Deux images consécutives représentent donc l'échantillon à deux profondeurs différentes séparés d'une taille de voxel.

C'est donc un outil intéressant pour caractériser le mouillage entre l'acier et l'aluminium et repérer si les deux matériaux sont bien en contact ou sont séparés par des porosités ou des fissures cachées (section IV.3.4).

I.3.5. L'analyse au MEB et à la sonde EDS de la couche intermétallique

En complément des informations apportées par la tomographie, il est nécessaire de caractériser la couche intermétallique se créant au niveau du contact entre le témoin et la pièce hôte. Le microscope à balayage électronique (MEB) permet d'inspecter des échantillons très petits. Un MEB utilise un canon à électron pour observer un échantillon et peut notamment compter les électrons envoyés par le canon qui ont été réémis par l'échantillon (Ruste, 2015a). Un MEB peut compter les électrons secondaires réémis par l'échantillon qui renseignent sur la topographie de la face observée. Il peut également compter les électrons rétrodiffusés qui renseignent sur la composition atomique de la face observée. Ces deux types d'électrons se distinguent aisément car ils ne sont pas réémis avec le même angle et avec le niveau d'énergie. Les électrons rétrodiffusés sont très sensibles au numéro atomique d'un atome. Plus un atome a un numéro atomique élevé, plus le nombre d'électrons rétrodiffusés est important. Ainsi il est possible de différencier par cette méthode, les éléments lourds (acier) des éléments légers (aluminium), les premiers apparaitront comme plus clairs que les seconds.

C'est donc un outil approprié pour inspecter l'interface acier-aluminium sur des zones très petites (µm). Il est utilisé section IV.3.5.

Lorsqu'une sonde EDS est associée au MEB, il est également possible d'analyser l'énergie générée par rayons X lors de la désexcitation des atomes de l'échantillon. (EDS = Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie). En effet les atomes ont gagné en énergie lorsqu'ils ont été bombardés par des électrons et se désexcitent en émettant entre autres des rayons X (photons) ayant différents niveaux d'énergie. L'énergie des photons réémis est caractéristique de l'élément rencontré. Ainsi en comptant les photons réémis et en regardant leur niveau d'énergie, il est possible de connaître quels éléments se trouvent dans l'échantillon et en quelle quantité.

Cet outil est donc approprié pour analyser la nature de l'interface acier-aluminium et les composés intermétalliques qui la forment. Il est utilisé section IV.3.5.

I.3.6. Conclusion

Enfouir un témoin fin en acier dans une pièce massive en aluminium est une tâche complexe. Le contrôle de l'apport énergétique lors de la soudure est un paramètre clé pour réaliser une liaison saine.

Un revêtement en zinc sur le témoin et la présence de silicium dans le fil d'apport sont des paramètres améliorant la mouillabilité de l'aluminium avec l'acier. La technologie CMT est un choix judicieux pour limiter la croissance de la couche fragile intermétallique réalisant la liaison entre le témoin et la pièce aluminium. La préchauffe de la pièce et l'ajout d'un échangeur de chaleur en contact avec le témoin sont utilisés par la suite pour assurer la non-détérioration du témoin par l'arc de soudure.

Diriger l'arc de soudure de manière à ne pas faire fondre le témoin reste le paramètre à contrôler qui est abordé dans les expériences menées et décrites dans le Chapitre IV.

L'analyse par tomographie rayons X doit permettre de caractériser l'interface aluminium acier à l'échelle millimétrique et ainsi s'assurer du bon mouillage entre les deux matériaux. L'analyse par microscope à balayage électronique et pas sonde EDS doit permettre de caractériser l'interface bimétallique entre l'acier et l'aluminium à l'échelle micrométrique. Cette interface doit exister pour s'assurer de la bonne fusion entre les deux éléments mais doit être inférieure à 10µm pour qu'elle ne soit pas trop fragilisée. La section suivante porte sur l'état de l'art nécessaire pour choisir où placer le témoin dans une pièce afin que celui-ci mesure la grandeur souhaitée.

I.4. Concevoir la pièce intelligente avec la technologie de mesure sélectionnée

La section précédente a permis d'investiguer des pistes sur comment enfouir un témoin dans une pièce massive. Dans cette section est présenté l'état de l'art sur l'importance du positionnement et de l'orientation du témoin sélectionné dans une pièce par rapport à la technologie utilisée. Les phénomènes de magnétostriction vis-à-vis du chargement sont étudiés pour comprendre le comportement magnétique sous charge et déchargé du témoin afin de choisir son matériau et son placement dans la pièce (Chapitre V). Les études permettant de comprendre comment les contraintes sont transmises dans une pièce hétérogène par simulation éléments finis sont également présentées.

I.4.1. Magnétostriction et chargement

Comme cela est évoqué section III.3.4.2; de nombreux auteurs ont étudié les comportements magnéto-mécaniques de divers aciers et métaux ferromagnétiques.

(Iordache, 2003) montre que la perméabilité magnétique mesurée aux états déchargés revient à sa valeur initiale pour des déformations élastiques mais est définitivement modifiée pour des déformations plastiques. Si la relation dans le domaine plastique, entre la perméabilité du témoin en charge et la perméabilité du témoin déchargé est monotone, alors il est possible de déterminer la contrainte maximale en charge dans le témoin à partir de la perméabilité de l'état déchargé correspondant. Ainsi il est possible d'avoir un effet mémoire grâce à la modification permanente de la perméabilité dû à la plastification du témoin.

Cependant, en fonction du matériau, la perméabilité aux états déchargés après plastification peut être inférieure ou supérieure à celle obtenue pour les états chargés (Iordache, 2003). Lorsque la perméabilité du témoin déchargé est inférieure à son état sous charge, son comportement en recharge est non monotone (croissant puis décroissant), et donc non utilisable pour mesurer en temps réel une contrainte en recharge.

De plus (Iordache, 2003) montre que le comportement magnétique en recharge après plastification et décharge n'est pas forcément linéaire. Certains matériaux retrouvent leur perméabilité initiale pour seulement 66 % de la charge initiale de plastification et stagnent jusqu'à la charge complète. D'autres l'atteignent linéairement pour 100 % de la charge initiale. Cela rend non bijectif la mesure en recharge partielle pour les premiers matériaux évoqués et rend impossible de distinguer une recharge à 70 % d'une recharge à 100 %. Dans ces cas-là, il est donc complexe/impossible d'utiliser la perméabilité d'un témoin pour mesurer la contrainte en temps réel pendant une recharge après plastification.

Si le témoin se comporte magnétiquement de manière symétrique en traction et en compression alors il est seulement nécessaire de le caractériser en charge en traction. Cependant, l'axe de facile aimantation d'un matériau ferromagnétique change en fonction de la nature de la contrainte appliquée (Figure 48).

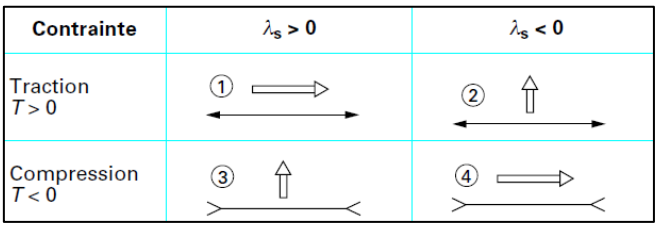


Figure 48 : Influence d'une contrainte (↔) sur la direction de l'axe de facile aimantation (==>) d'un matériau magnétostrictif isotrope à champ nul (Hartemann, 1999)

(Kashiwaya, 1991) étudie le comportement d'un polycristal de fer sous des contraintes bi-axiales et remarque un comportement magnétique symétrique sous certaines conditions. Il le mesure pour une direction d'aimantation dans le plan et à 45° des vecteurs de contraintes principales σ_1 et σ_2 mais aussi à 90° de celles-ci, c'est-à-dire dans l'axe σ_3 donc dans l'épaisseur de l'éprouvette. Le comportement est symétrique par rapport à l'axe $\sigma_1 = \sigma_2$.

Le comportement en traction-compression du témoin peut donc être symétrique magnétiquement si les contraintes principales dans le témoin évoluent de manière égales et opposées (donc perpendiculairement à l'axe $\sigma_1 = \sigma_2$) et que l'aimantation est faite à 45° des contraintes principales ou dans l'épaisseur du témoin.

Ainsi si un témoin en acier suit le même comportement magnétique que le polycristal de fer observé par (Kashiwaya, 1991), il faut, pour observer un comportement magnétique symétrique en traction et compression, l'aimanter :

- Soit tout le temps dans l'axe σ_3 (épaisseur du témoin)
- Soit tout le temps dans l'axe σ_1 = -σ_2 (à -45° de l'axe de traction-compression dans le plan du témoin)
- Soit sur l'axe σ_1 en traction et sur l'axe σ_2 en compression

Ces configurations imposeront les modes et directions d'aimantation de l'appareil de mesure de la perméabilité.

I.4.2. Simulation éléments finis statique sur pièce bi-matériaux

L'usage d'un témoin pour mesurer les contraintes dans la pièce nécessite que les contraintes dans la pièce soient bien transmises à celui-ci. Plusieurs études modélisant par éléments finis des pièces bimétalliques renseignent sur la transmission de contraintes entre les deux matériaux en fonction des surfaces en contact et du chargement.

I.4.2.1. Liés par une des faces

a) Partiellement

(Lin et al., 2013) ont modélisé par méthode éléments finis le comportement mécanique sous traction de deux plaques d'aluminium et acier soudés ensemble par CMT. Ils ont ainsi ajusté la simulation sur des résultats obtenus par expériences (rupture de la zone IM). Les deux modes de rupture obtenus par expériences ont ainsi été modélisés. Il a été identifié que lorsque la plaque en acier présente une haute limite d'élasticité ou une forte épaisseur, la rupture se fait au niveau de la ligne de fusion entre la soudure aluminium et la plaque aluminium. Lorsque la plaque en acier est de faible épaisseur et présente une faible limite d'élasticité, celle si se plastifie avant l'aluminium, des concentrations de contraintes apparaissent sur les bords de la plaque en acier au niveau de l'interface et ainsi la rupture se fait au niveau de cette dernière. La force pour arriver à la rupture est 16 % plus faible sur la rupture à l'interface que sur la rupture à la ligne de fusion, cependant l'allongement à la rupture est quatre fois plus important.

La couche intermétallique est représentée par une seule ligne d'éléments de 130 µm d'épaisseur. Cette couche est en réalité bien plus faible. Même si la ligne est soumise a du cisaillement, le fait qu'elle ne soit composée que d'un seul élément d'épaisseur, pose question sur la validité des résultats. La faible épaisseur de la couche intermétallique rend la tâche complexe et imposerait un très fort gradient sur la taille des éléments.

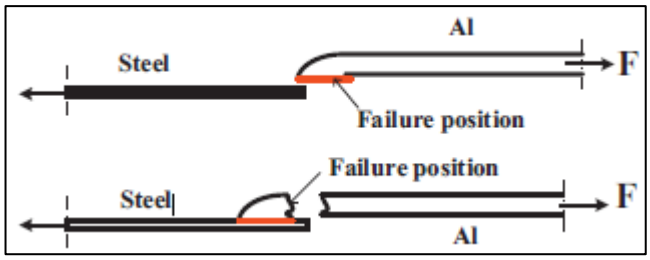


Figure 49: Localisation pour les deux modes de rupture identifiés (Lin et al., 2013)

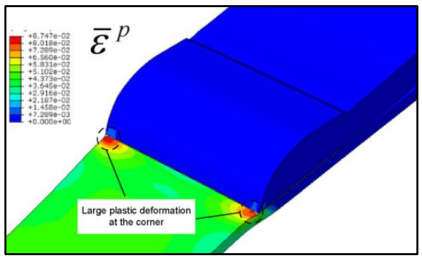


Figure 50 : Localisation de la concentration de contrainte pour une rupture à l'interface (Lin et al., 2013)

Ainsi les concentrations de contraintes semblent être localisées plutôt sur l'élément le plus fin lorsqu'il a une limite d'élasticité faible. Elles se situent sur les bords de la jonction lorsque l'élément le plus fin se plastifie.

b) Complètement

(Li et al., 2019) ont modélisé une éprouvette bimétallique. Une épaisseur correspond à de l'acier inoxydable et une autre à de l'acier carbone. Les couches de diffusion intermédiaires sont également représentées. Ils montrent ainsi que la délamination à l'interface est due à l'apparition d'une contrainte de cisaillement importante due à la différence de contrainte normale entre les deux matériaux. Lorsque la contrainte de cisaillement est trop importante il y a délamination.

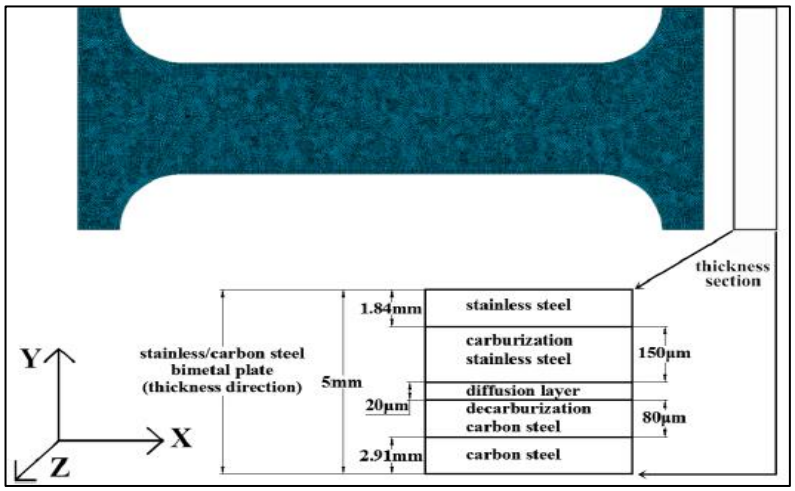


Figure 51 : Modélisation des différentes couches de l'éprouvette de traction inox-acier (Li et al., 2019)

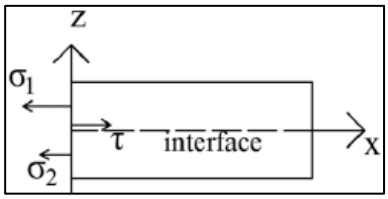


Figure 52 : Modélisation des contraintes à l'interface inox-acier (Li et al., 2019)

Il semble donc important de limiter la différence de contrainte normale de part et d'autre d'une interface bi-matériaux pour limiter la contrainte de cisaillement et ainsi les risques de délamination.

I.4.2.2. Liés par les deux faces (sandwich-composite)

(Han et al., 2021) expliquent que les caractéristiques mécaniques d'un composite suivent la loi des mélanges. Les propriétés mécaniques d'un composite sont calculées par la somme des propriétés mécaniques de ces composants pondérés par leur fraction volumique. Cela est vérifié pour les propriétés élastiques (module de Young, limite d'élasticité) et reste vrai pour les autres si la liaison entre les éléments du composite est de qualité. Cependant, cela caractérise le comportement global de l'éprouvette, et non pas la transmission de contrainte entre les divers composants de l'éprouvette.

I.4.2.3. Liés dans l'épaisseur

Une modélisation analytique de la transmission de contrainte sur un problème plan d'une plaque ayant une inclusion circulaire en traction a été réalisée par (Deryugin and Lasko, 2012). Cette modélisation est basée sur le principe de superposition Figure 53.

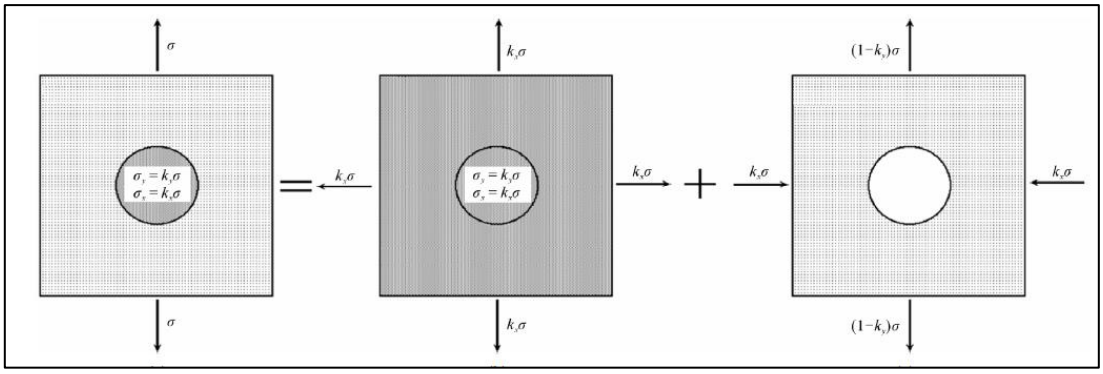


Figure 53 : Principe de superposition appliqué à un cylindre traversant encastré dans une plaque en traction (Deryugin and Lasko, 2012)

Les facteurs de transmission longitudinaux et orthogonaux ont été ainsi déduits pour une traction suivant l'axe y. Ces coefficients dépendent du module de Young et du coefficient de poisson de la plaque (E_1 et ν_1) et de l'inclusion (E_2 et ν_2). Ces coefficients sont calculés par les équations suivantes :

$$k_x = \frac{E_2\left[(3\nu_2 - 1)E_1 + (1 - 3\nu_1)E_2\right]}{(E_1 + 2E_2)^2 - \left[\nu_2 E_1 + (1 - \nu_1)E_2\right]^2}$$

$$k_y = \frac{E_2\left[(3 - \nu_2)E_1 + (5 + \nu_1)E_2\right]}{(E_1 + 2E_2)^2 - \left[\nu_2 E_1 + (1 - \nu_1)E_2\right]^2}$$

Ils montrent ainsi que les contraintes normales sont constantes et que la contrainte de cisaillement est nulle dans l'inclusion. Ils calculent également la répartition de la contrainte dans la pièce autour de l'inclusion pour un couple de matériaux (doux/dur). Lorsque l'inclusion est rigide dans un matériau souple, les contraintes maximales sont les contraintes normales dans l'inclusion et correspondent à une augmentation de 40 % de la contrainte appliquée. Les autres contraintes sont négligeables. Lorsque l'inclusion est souple dans une pièce hôte rigide, la concentration de contrainte normale est importante à l'interface entre les deux matériaux. Les localisations des minimums et maximums de contrainte sont inversés par rapport au cas précédent. Ce cas se rapproche de la concentration de contrainte qui apparait dans les plaques trouées Figure 54.

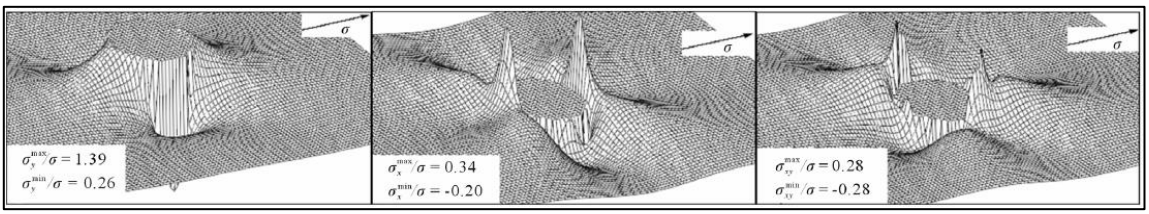


Figure 54 : Répartition des contraintes principales et de cisaillement maximal dans la plaque et dans le cylindre encastré (Deryugin and Lasko, 2012)

Ce cas est mineur par rapport aux autres pour une inclusion complète du témoin. En effet, la tranche du témoin n'est pas la surface de contact la plus grande donc pas la plus importante pour la transmission de contraintes.

I.4.3. Conclusion

L'étude bibliographique permet de souligner les conditions nécessaires pour observer un comportement magnétique monotone et symétrique en traction-compression sur un témoin magnétostrictif. Cette section a également montré la difficulté de mesurer de la recharge partielle.

En outre, le comportement mécanique des pièces bi-matériaux a été présenté.

Insérer un élément rigide dans une pièce hôte ayant un faible module de Young semble entraîner de forts risques d'augmentation de la contrainte de cisaillement et ainsi de délamination à l'interface entre les deux éléments. De plus la couche intermétallique présente à cette interface joue un rôle important dans la tenue de la liaison mais est cependant difficile à représenter dans des modélisations éléments finis de pièces macroscopiques à cause de son épaisseur microscopique. Il est donc important d'éviter ces conditions, ou au mieux d'éviter de les aggraver. Insérer une pièce rigide dans une pièce souple limite donc sa résistance. Cela peut être acceptable dans le domaine élastique mais le très fort changement de pente $\sigma - \epsilon$ au passage dans le domaine plastique n'est plus acceptable concernant la pièce et cela est étudié plus en détail dans le Chapitre V.

I.5. Conclusion de la bibliographie

Ces travaux de thèse ont été entrepris afin de répondre à la problématique suivante :

Comment concevoir et fabriquer des pièces métalliques intelligentes avec le procédé WAAM ?

L'étude bibliographique des verrous scientifiques menée dans ce chapitre permet de préciser quatre questions de recherche auxquelles chaque chapitre qui suit dans ce manuscrit répond.

Afin de réaliser des pièces massives avec le procédé WAAM certains paramètres ont pu être identifiés par la bibliographie mais d'autres restent à déterminer. Du premier verrou, découle la question de recherche : **Comment déterminer les paramètres non fixés par la bibliographie pour fabriquer une pièce massive en WAAM ?** Pour cela, des campagnes expérimentales présentées au Chapitre II sont réalisées. Ces paramètres sont ensuite évalués par la réalisation de blocs dont des éprouvettes de traction sont extraites et dont les propriétés mécaniques sont évaluées.

Diverses technologies de mesure de contraintes sont présentées et synthétisées vis-à-vis de leur capacité d'insertion dans le chapitre bibliographique ainsi que diverses méthodes de sélection multicritères. Du deuxième verrou découle la question de recherche : **Comment sélectionner un capteur de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM en fonction de ses caractéristiques et des spécifications du produit à rendre intelligent ?** Un guide de sélection basé sur des critères d'évaluation pour l'insertion est proposé et illustré au Chapitre III.

Le Chapitre II et le Chapitre III permettent de réaliser un choix de technologie pour la suite de l'étude. Ainsi, la technologie de mesure sélectionnée s'appuie sur le contrôle par induction d'un témoin magnétostrictif fin enfoui dans une pièce amagnétique.

Afin de rendre fabricable une pièce intelligente avec la technologie sélectionnée, un état de l'art est réalisé dans le chapitre bibliographique sur l'insertion en fabrication additive. Les enjeux liés à la technologie de mesure sélectionnée y sont également présentés : la soudure aluminium-acier et la soudure d'un élément fin avec un élément épais. Du troisième verrou émerge la question de recherche **: Comment insérer sainement un témoin fin en acier dans une pièce massive en aluminium durant sa fabrication par procédé WAAM ?** Diverses configurations sont expérimentées et leur capacité à réaliser une soudure aluminium-acier ne détériorant pas le témoin est évaluée par tomographie à rayons X et par microscopie à balayage électronique en rétrodiffusion corpuscule au Chapitre IV

Pour concevoir une pièce intelligente avec cette technologie, une revue des connaissances actuelles est réalisée sur le comportement magnétostrictif des aciers ainsi que sur les simulations éléments finis bi-matériaux. A partir du dernier verrou, cette ultime question de recherche est identifiée : **Comment choisir et positionner un témoin dans une pièce en fonction du chargement et de la contrainte à mesurer ?** Une méthode basée sur l'analyse de la chaine de mesure, du mesurande à la captation de la signature magnétique du témoin par la sonde de mesure et sur des analyses éléments finis, est développée au Chapitre V.

Chapitre II : Détermination des paramètres de fabrication pour la réalisation d'une pièce massive

L'objet de ce chapitre est de fixer des paramètres permettant de produire des pièces massives de qualité en un temps raisonnable. Les paramètres fixés en premier temps par la connaissance métier et la littérature scientifique à la section I.1.5 du chapitre bibliographique sont décrits Tableau 5.

Tableau 5: Paramètres de soudage fixés

Gaz	**Fil**	**Substrat**	**Température de préchauffe**
100 %Ar	4043 ; Ø 1,2mm	5083 ; 250*250*5mm	150 °C
Débit Gaz	**Pregaz/Postgaz**	**Work/Travel Angle**	**CTWD**
20 L/min	0,5s	0°	17 mm
Ecart vecteur a	**Synergie**	**Correction de hauteur d'arc**	**Début et Fin d'arc**
0,667w	CMTPA 1369	0 %	Nominaux
Hauteur de couche	**Trajectoire**	**Ordre de Dépose**	**Ajustements Locaux**
2h/3a	Recouvrement par zigzag discontinu	Intérieur vers extérieur en alternant les côtés	Inversion du sens de dépose entre chaque couche

Certains paramètres n'ont pas pu être fixés par la bibliographie et sont des verrous pour la réalisation de pièces massives. Ces paramètres sont :

- WFS – λ_{ratio} (=WFS/TS) – EP/EN (campagne expérimentale 1)
- La température « d'interpass » (campagne expérimentale 2)
- La surépaisseur à appliquer ainsi que l'ordre de dépose des cordons (propositions)

Certains sont fixés à l'aide de deux campagnes expérimentales. D'autres sont des propositions de l'auteur. Ces paramètres sont utilisés pour produire deux blocs. Des éprouvettes de traction sont ensuite extraites de ces blocs et les caractéristiques mécaniques obtenues sont discutées.

II.1. Campagnes expérimentales pour la sélection des paramètres restants

Deux campagnes expérimentales sont réalisées afin de sélectionner les paramètres restant pour réaliser une pièce massive.

II.1.1. Campagnes expérimentales pour le choix des paramètres (WFS-TS-EP/EN)

Des campagnes expérimentales sont menées pour définir les paramètres de débit de matière (WFS), d'étalement du cordon (TS) et d'apport énergétique (EP/EN). TS est étudié à travers l'apport de matière instantané $\lambda_{ratio} = WFS/TS$.

II.1.1.1. Choix des niveaux

a) Apport de matière instantané : λ

Les niveaux concernant l'apport de matière instantané $\lambda_{ratio} = WFS/TS$ doivent être compris entre 5 et 25 selon (Ayarkwa et al., 2015). Un apport de matière trop faible ou trop important nuit à la régularité du cordon. Les niveaux testés sont donc limités à 4 niveaux équi-répartis entre 8 et 20, plage sur laquelle (Ayarkwa et al., 2015) ont le plus grand nombre d'échantillons valides.

b) Vitesse de dévidage de fil : WFS

Les niveaux concernant WFS doivent être définis sur les points de définition de la loi synergique sélectionnée qui sont les points d'inflexion de la courbe. Il est conseillé de ne pas prendre une vitesse de dévidage de fil trop faible par souci d'efficacité. Pour un apport de matière donné, une vitesse de fil trop grande n'est pas testée non plus car elle entraine une vitesse de torche trop importante. Or une vitesse de torche trop importante entraine une non régularité du cordon (Adebayo et al., 2013). Ainsi les vitesses de fil au-delà de 12,4 m/min ne sont pas testées.

Les vitesses de fil en dessous de 4,5 m/min ne sont pas testées car ces vitesses ne représentent pas un débit assez productif.

L'énergie massique de la loi CMTPA 1369 est décrite Figure 55. Deux niveaux sont choisis aux extrémités du domaine exploré : 4,5 m/min et 12,4 m/min. Dans cet intervalle, un niveau de plus est choisi sur le point d'inflexion de la courbe : 8,3 m/min.

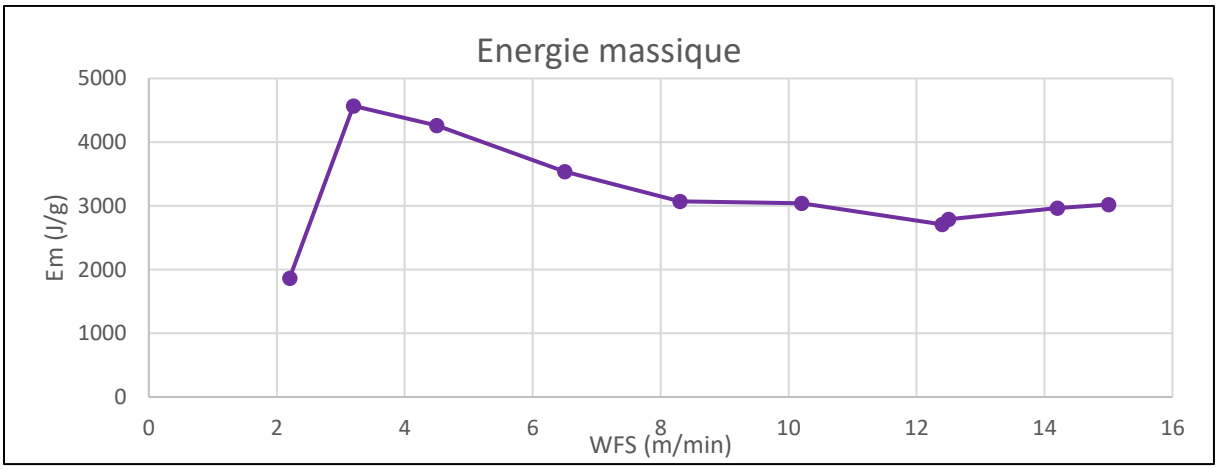


Figure 55: Energie massique de la loi CMTPA 1369 en fonction de WFS

c) Rapport de polarité : EP/EN

Le paramètre spécifique au mode peut entraîner une variation d'énergie non linéaire sur sa fenêtre paramétrique. C'est le cas pour la loi CMTA 1368 (cf Figure 20, section I.1.4.3) mais pas pour la loi CMTPA 1369. Les niveaux concernant ce paramètre sont donc équi-répartis sur sa fenêtre paramétrique.

Les niveaux EP/EN sont choisis de -2,5 à 5 de manière équi-réparti. Au-delà de -3,4 le mode CMTPA ne produit plus de cycle positif et fonctionne uniquement avec des cycles en polarité négative. Cela dégrade le nettoyage cathodique du substrat et du fil de l'oxyde qui les recouvre naturellement. C'est pourquoi le paramètre EP/EN n'a été étudié que sur [-2,5 ;5].

d) Conclusion

Les niveaux choisis pour le plan d'expérience à réaliser sont décrits Tableau 6.

Tableau 6: Niveaux des paramètres testés lors du plan d'expérience

λ_{ratio} (WFS/TS)	WFS (m/min)	EP/EN (nb +/ nb -)
8	4,5	-2,5 (3/10)
12	8,3	0 (10/10)
16	12,4	2,5 (17/10)
20	-	5 (25/10)

Le comportement des paramètres du plan d'expérience étant linéaire entre les niveaux choisis, il est possible dans un second temps de chercher à les optimiser pour obtenir de meilleurs résultats.

II.1.1.2. Placement et longueur des cordons

Les cordons à souder pour le plan d'expériences doivent être suffisamment longs. Il faut pouvoir mesurer avec précision des dimensions du corps du cordon et les distinguer des dimensions de début et de fin de cordons. Les cordons doivent également être soudés loin des bords du substrat afin d'éviter tout effet de bords entrainant une surchauffe et un effondrement non souhaité des cordons. Des cordons de 95 mm de long sont donc soudés. Il y a 4*3*4=48 conditions différentes en tout. L'intensité moyenne, la tension moyenne et la vitesse réelle de dévidage de fil moyenne sont enregistrées par le poste de soudure à une fréquence de 10Hz pour chaque cordon.

II.1.1.3. Evaluation des cordons soudés

Les cordons représentant chaque condition sont ensuite évalués. Il est également nécessaire d'évaluer la régularité des cordons soudés. Les cordons ayant des dimensions non stables sur la longueur de leur corps sont rejetés. Les cordons éliminés pour non régularité géométrique visible à l'œil nu sont les suivants :

- Tout ceux ayant le paramètre EP/EN égal à -2,5
- Tout ceux ayant un couple λ_{ratio} – WFS valant 8-12,4 ; 16-4,5 et 20-4,5

L'énergie massique des cordons soudés est calculée à partir des mesures réalisées depuis le générateur. Le cordon correspondant au set λ_{ratio}–WFS-EP/EN valant 12-4,5-2,5 n'est pas non plus considéré. En effet son énergie n'a pu être enregistrée par le poste de soudure mais il présente un rapport largeur/hauteur inférieur à 2 démontrant un mouillage insuffisant.

Les cordons restants sont scannés à l'aide d'un scanner 3D (HandyScan 3D) ayant une résolution de 0,2 mm (Figure 56). Une section du cordon a été mesurée au projecteur de profil. Les résultats donnés par le scanner 3D et le projecteur de profil étant proches, le scanner 3D a été gardé comme outil de mesure. Les cordons scannés sont traités à l'aide du logiciel Gom Inspect © afin d'extraire pour chaque cordon 7 sections réparties de manières équidistante sur le corps du cordon (Figure 57).

Ces sections sont compilées sur Microsoft Excel © comme un nuage de point. La section moyenne du cordon est extraite et l'arc de cercle le plus proche du nuage de point est trouvé par la méthode des moindres carrés. L'angle de mouillage peut être estimé à partir de ce cercle.

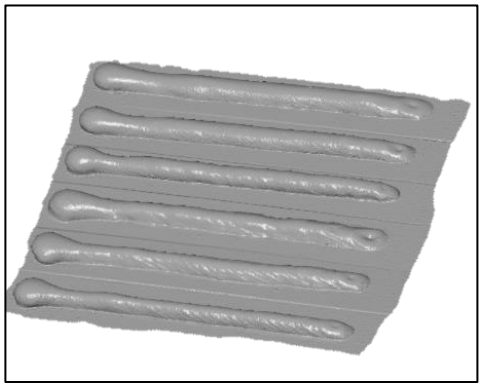


Figure 56: Scans de cordons soudés

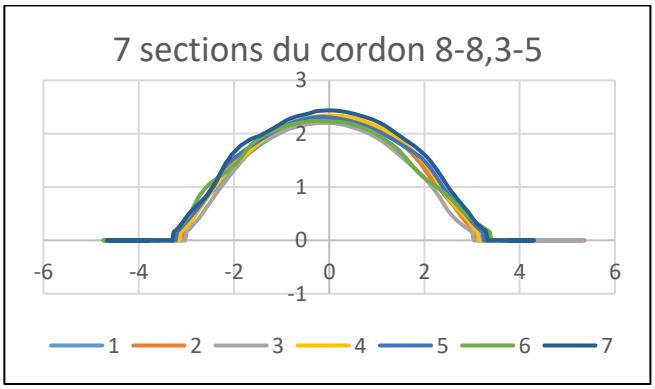


Figure 57: 7 sections du cordon 8-8,3-5 (λ_{ratio}-WFS-EP/EN)

Le rapport Φ permet également d'avoir une bonne idée du mouillage et est une grandeur plus aisément mesurable que l'angle de mouillage. Cette grandeur est utilisée pour l'évaluation des cordons.

Un graphique Largeur/Hauteur (Φ) en fonction de l'apport d'énergie massique est réalisé (Figure 58). La taille des marqueurs du graphique représente le niveau EP/EN. Les plus petits marqueurs représentent une soudure avec un EP/EN valant 0 et les plus gros, un EP/EN valant 5.

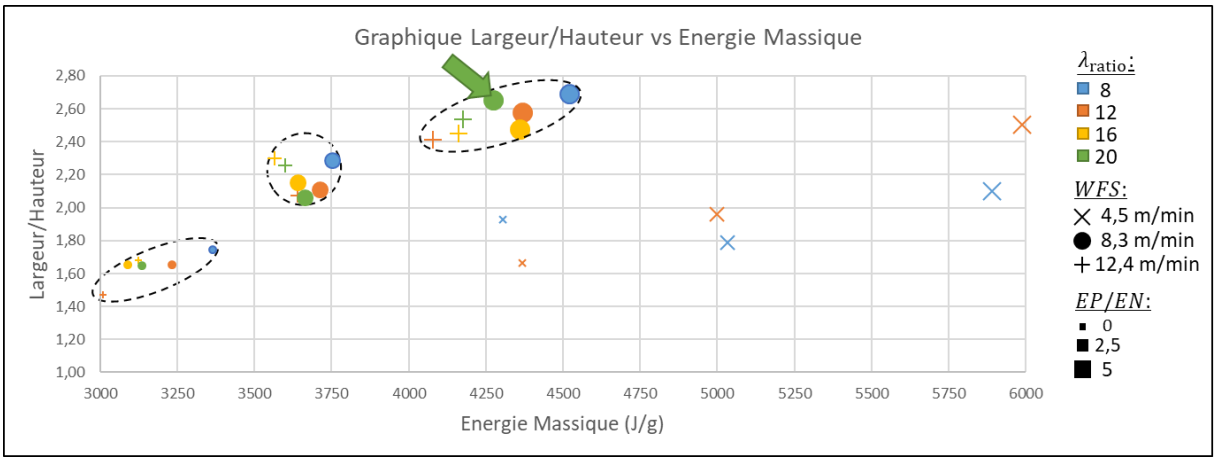


Figure 58: Graphique d'aide à la sélection de paramètres de soudage (Φ vs Energie massique)

Trois clusters se détachent correspondant au trois niveaux de balance EP/EN : 0 ; 2,5 et 5. Le cluster ayant un rapport Φ <2 est éliminé. Cela indique que les cordons réalisés avec un paramètre EP/EN=0 n'ont pas un mouillage suffisant pour être juxtaposés sur un substrat à 150 °C. Les cordons réalisés avec une vitesse de fil de 4,5 m/min sont en dehors des clusters identifiés car très énergétiques.

Le cluster ayant le meilleur mouillage, donc le plus haut rapport Φ est sélectionné, il correspond à une balance EP/EN de 5 et à un rapport $\Phi \geq 2{,}4$ ce qui correspond à un angle de mouillage de 100°. Dans ce cluster, seuls deux cordons ont un rapport $\Phi \geq 2{,}6$ soit 105°. Entre ces deux cordons, celui ayant un apport de matière de 20 et une vitesse de dévidage de fil (WFS) de 8,3 m/min est sélectionné. Il permet de minimiser l'énergie massique donc le temps nécessaire pour revenir à la température « d'interpass » et de produire un cordon ayant a priori moins de porosités. De plus, le cordon choisi a un plus grand apport de matière, ce qui permet de maximiser la régularité du cordon. Cela permet également de maximiser la régularité des juxtapositions et des empilements en minimisant le nombre de cordons. D'une part, minimiser le nombre de cordons à juxtaposer pour couvrir une largeur permet de minimiser le nombre de sillons sur la face supérieure. D'autre part, une erreur de mesure d'un cordon est proportionnellement plus importante sur un cordon mince que sur un cordon large et il en est donc de même sur l'erreur répercutée dans le calcul de la distance entre deux cordons juxtaposés.

Les paramètres et dimensions décrits Tableau 7 sont donc sélectionnés pour réaliser la première couche à température de préchauffe de 150 °C. La température de préchauffe entraîne une dérive des paramètres de fabrication par rapport à leurs valeurs nominales. Les valeurs réelles mesurées de ces paramètres sont donc précisées dans le tableau.

Tableau 7:Récapitulatif des paramètres de soudures et dimensions géométriques du cordon sélectionné

WFS	**λ_{ratio}**	**EP/EN**	**TS**
8,3 m/min	20	5 (25/10)	41,5 cm/min
WFS réel	**U réel**	**I réel**	**Energie massique réelle**
9,8 m/min	17,2 V	124 A	4276 J/g
Largeur	**Hauteur**	**Angle de mouillage**	**Largeur/hauteur (Φ)**
9,87 mm	3,73 mm	106°	2,65

II.1.2. Température « d'interpass » pour les couches supérieures

Il est ensuite nécessaire de spécifier la température « d'interpass » pour les couches supérieures. En effet, la matière accumulée couche par couche change la dynamique thermique lors du soudage. Ainsi souder sur un substrat à 150 °C ou sur une première couche à 150 °C peut produire un cordon de largeur différente.

L'objectif est de trouver une température « d'interpass » permettant d'obtenir un cordon de deuxième couche d'une largeur proche de celle du cordon de première couche. L'objectif est de maximiser la régularité de la couche réalisée en conservant la même distance entre deux cordons peu importe la couche.

Une première couche est donc réalisée avec les paramètres retenus : c'est à dire en attendant entre chaque cordon que la température de la surface où le cordon doit être déposé atteigne 150 °C (qui est la température de préchauffe sélectionnée). La première couche est ensuite chauffée jusqu'à atteindre la température « d'interpass » souhaitée. Cette température est mesurée à l'aide d'un thermocouple K. Un cordon est ensuite soudé là où la température a été mesurée. Un seul cordon est soudé par température « d'interpass ». Ils sont espacés entre eux et avec les cordons de bords de la première couche de deux écart-vecteurs (Figure 59). Les températures « d'interpass » testées s'échelonnent de la température de préchauffe à la température maximale de 300 °C tous les 25 °C. Sept cordons sont donc soudés individuellement, un pour chacune des sept températures « d'interpass » testées.

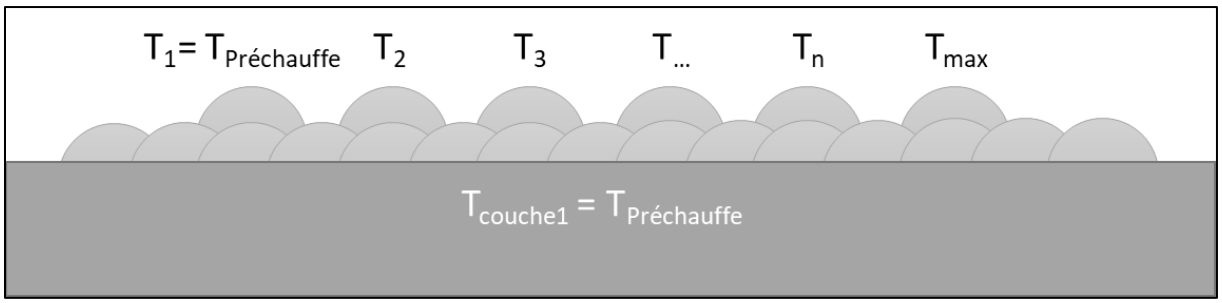


Figure 59: Expérience de sélection de la température « d'interpass »

Les cordons sont ensuite scannés afin d'obtenir leurs dimensions. Le même processus d'analyse via Gom Inspect © et Microsoft Excel © est réalisé pour obtenir les dimensions à partir des scans des cordons. Les résultats sont présentés Figure 60.

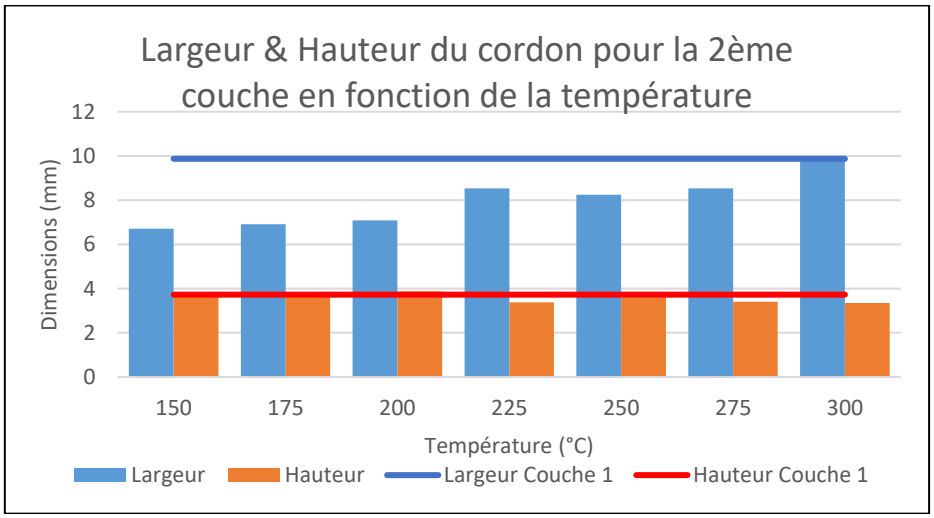


Figure 60: Dimensions des cordons de seconde couche pour différentes températures « d'interpass »

Une température identique à celle de la température de préchauffe entraine un cordon de 6,7 mm de large pour la deuxième couche (contre 10 mm de large pour la première couche).

Une température « d'interpass » de 300 °C permet d'obtenir une largeur de cordon identique à celle obtenue lors de la première couche. Cette température est sélectionnée pour la réalisation des couches supérieures des blocs.

II.1.3. Proposition de stratégie de fabrication

Il a été décidé dans la section I.1.5 d'utiliser une trajectoire zigzag discontinue. Les défauts géométriques de début et de fin des cordons sont ainsi compensés l'un par l'autre. Pour la même raison, le sens de dépose des cordons est inversé à chaque couche. Multiplier le nombre de dépose permet de contrôler l'apport de chaleur et d'éviter tout effet d'effondrement lié à la surchauffe. Cette stratégie permet également de localiser les départs et arrêts d'arcs sur les contours de la pièce afin qu'ils ne se trouvent pas dans le cœur des blocs, là où les éprouvettes sont extraites.

Il est donc nécessaire de prendre en compte une surépaisseur dans le sens de dépose des cordons qui prend en compte les débuts et fins des cordons afin de les éloigner du corps de la pièce (Figure 61). Il faut également prendre en compte la sinuosité des bords dans le sens de juxtaposition des cordons ; une surépaisseur d'un cordon est donc ajoutée par couche. De plus, les paramètres de soudage ne sont pas modifiés sur les bords pour compenser l'effondrement, comme peuvent le faire (Y. Li et al., 2018a), le nombre de couches total est donc incrémenté pour compenser cela. Les trajectoires et ajustements ne sont pas choisis de manière à minimiser les déformations du substrat qui est relativement fin (5 mm). Une couche de surépaisseur supplémentaire est donc ajoutée.

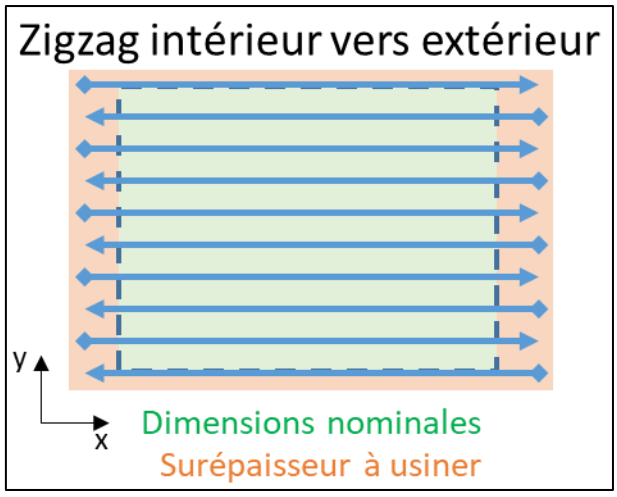


Figure 61:Trajectoire zigzag avec prise en compte des surépaisseurs

Les cordons sont juxtaposés en alternance gauche-droite en commençant par les cordons les plus à l'intérieur de la couche pour finir par les cordons les plus aux bords de la couche. L'ordre de dépose proposé permet d'éloigner deux cordons successifs et de minimiser le temps d'attente nécessaire pour revenir à la température « d'interpass ». L'ordre de dépose des cordons sur deux couches successives est présenté (Figure 62).

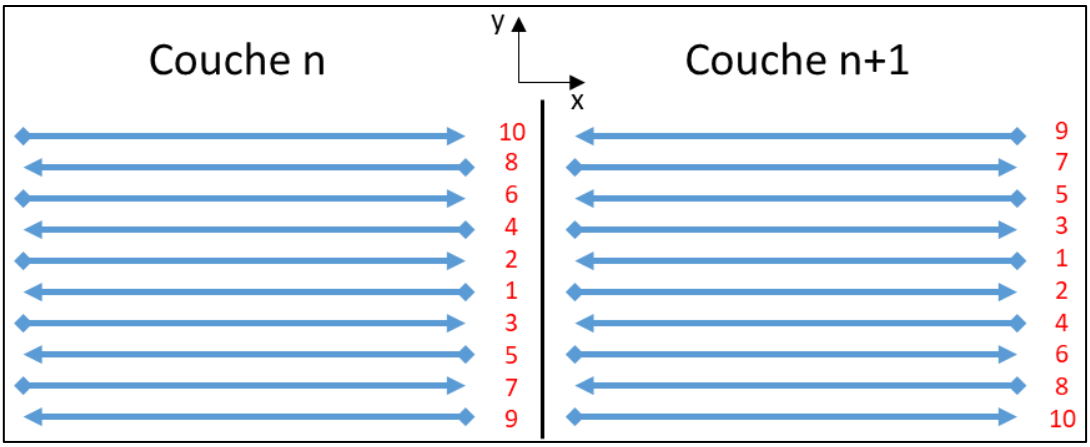


Figure 62: Sens et ordre de parcours de la trajectoire sélectionnée sur deux couches successives

II.1.4. Synthèse

Les paramètres qui ont été définis dans ce chapitre pour réaliser pleinement une pièce massive sont décrits Tableau 8.

Tableau 8:Récapitulatif des paramètres fixés et proposés dans cette section

WFS	λ_{ratio}	**EP/EN**	**TS**
8,3 m/min	20	5 (25/10)	41,5 cm/min
T° d'interpass	**Surépaisseur minimale (XYZ)**	**Ordre de dépose**	
300 °C	X : 30 mm (début et fin de cordon) Y : 1 largeur de cordon Z : 2 couches	Intérieur vers extérieur	

La méthode décrite dans cette section permet de sélectionner des paramètres de soudage et d'empilement convenable pour la réalisation de pièces massives dans un temps raisonnable. Cette méthode est mise à l'épreuve section suivante par la réalisation de blocs en aluminium.

II.2. Validation expérimentale des paramètres sélectionnés

Les paramètres sélectionnés sont mis à l'épreuve par la réalisation de deux blocs de (160*35*14) mm^3 dont des éprouvettes de traction sont extraites et étirées afin d'évaluer leurs propriétés mécaniques. Les deux blocs réalisés seront appelés « Bloc L » et « Bloc T ». Le premier est réalisé avec des cordons longitudinaux, parallèles à la longueur du bloc. Le second est réalisé avec des cordons transversaux, perpendiculaires à la longueur du bloc.

II.2.1. Démarche expérimentale et fabrication

Le bloc L est réalisé avec une direction de dépose des cordons parallèles à la longueur principale du bloc (x) et le bloc T avec une direction de dépose des cordons perpendiculaire à celle-ci (y). Une surépaisseur de 30, 10 et 6 mm est ajoutée au dimensions x ; y et z pour le bloc L et aux dimensions y, x et z pour le bloc T.

Le substrat est nettoyé à l'alcool et brossé à la paille de fer avant d'être préchauffé. La température de préchauffe puis « d'interpass » est maintenue grâce à un plateau chauffant. La température est mesurée à l'endroit de dépose d'un cordon antérieurement à sa dépose en trois points répartis sur la longueur du trajet à l'aide d'un thermocouple K.

Après la dépose d'un cordon, celui-ci est nettoyé par brossage à la paille de fer. Chaque cordon est brossé après avoir été déposé afin d'enlever l'oxydation présente à la surface des cordons réalisés pour qu'elle ne se retrouve pas dans le bain de soudure du cordon suivant.

Lorsque cela est nécessaire, le plateau chauffant est arrêté et un soufflage d'air depuis la buse de soudage est appliqué le long du trajet du cordon à déposer afin de diminuer le temps de d'attente nécessaire pour revenir à la température souhaitée. Si la température mesurée est inférieure à la température voulue, le plateau chauffant est rallumé.

Le cordon suivant est déposé quand la température de surface est égale à la température de préchauffe pour les cordons de la première couche, ou égale à la température « d'interpass » pour les couches supérieures.

Les blocs obtenus sont présentés Figure 63 et Figure 64.

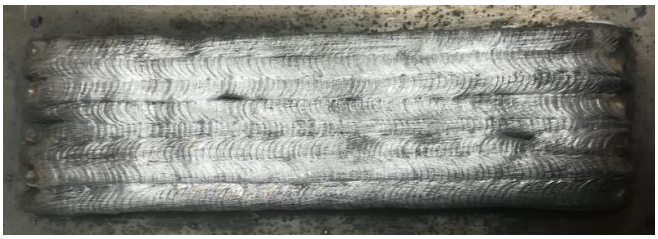


Figure 63: Photo du Bloc L

Figure 64: Photo du Bloc T

Afin d'évaluer la qualité des blocs réalisés, des éprouvettes de tractions (Figure 66) sont extraites par électroérosion à fil. Les éprouvettes respectent la norme ASTM B557M. Les dimensions des éprouvettes sont présentées Figure 65.

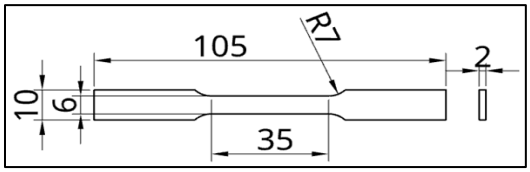


Figure 65:Dimensions nominale de l'éprouvette

Figure 66: Photo d'une éprouvette extraite du bloc T

Sur chaque bloc cinq éprouvettes sont extraites dans la longueur du bloc (Figure 67 et Figure 68). Des éprouvettes sont extraites avec la normale à la face principale perpendiculaire à la normale au substrat (bleues et jaunes), d'autres parallèle à la surface du substrat (oranges et violettes).

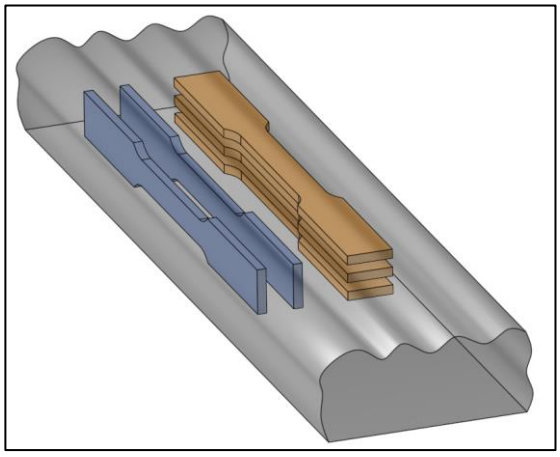


Figure 67: Schéma de placement des éprouvettes dans le Bloc L

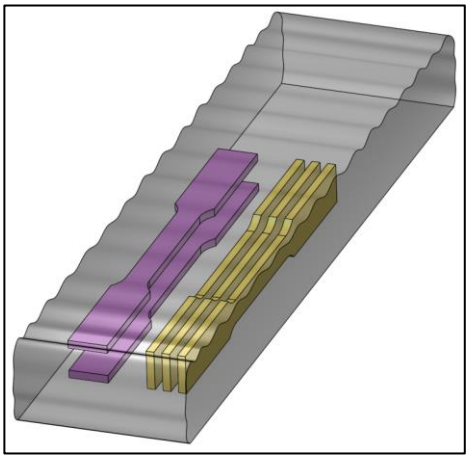


Figure 68: Schéma de placement des éprouvettes dans le Bloc T

Les éprouvettes sont extraites par électroérosion à fil. Les étapes d'extraction se divisent en une étape de contournage et une étape de tranchage du bloc contourné pour les éprouvettes étant parallèle au substrat. Les éprouvettes perpendiculaires au substrat nécessitent au préalable qu'un sous-bloc rectangulaire soit d'abord extrait avant d'être positionné à 90° pour être contourné.

Différentes étapes sont illustrées dans les photos (Figure 69 à Figure 72).

Figure 69 : Première étape de contournage sur le Bloc T

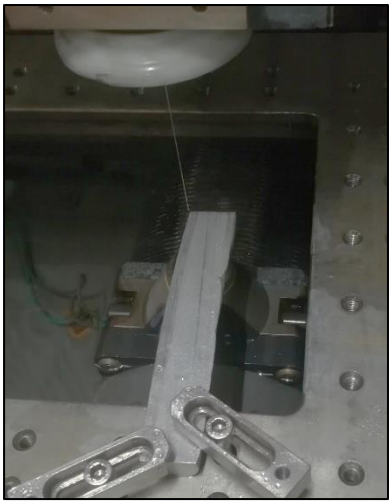


Figure 70: Seconde étape de contournage dans l'épaisseur d'un sous-bloc

Figure 71: Bloc T Contourné en 2 sous blocs

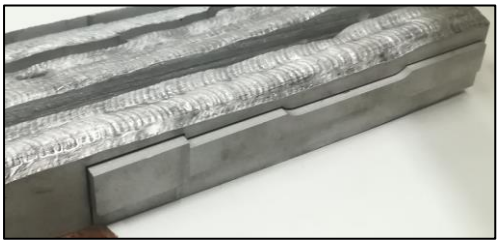


Figure 72: Sous-bloc contourné dans l'épaisseur du bloc L

II.2.2. Essais de traction

Des tests de tractions sont réalisés sur ces éprouvettes à l'aide d'une machine de traction MTS4M de capacité maximale de charge à 20KN (Figure 73). La déformation des éprouvettes est monitorée par corrélation d'images grâce au système ARAMIS de GOM. Un extensomètre numérique est défini par l'application de deux tâches sur l'éprouvette (Figure 74). Le logiciel GOM Correlate© permet de réaliser le suivi de déformation.

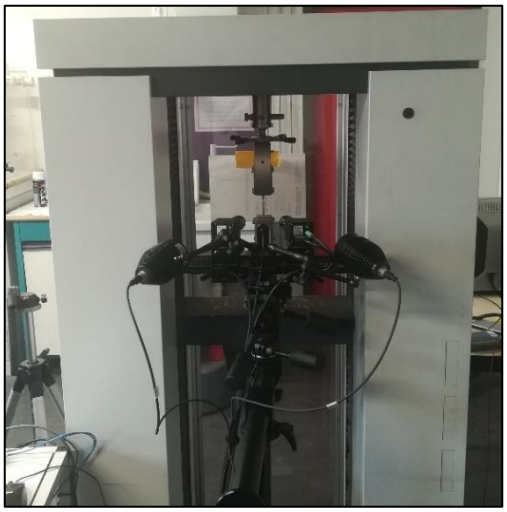


Figure 73: Machine de traction MTS4M et système ARAMIS de suivi de déformation

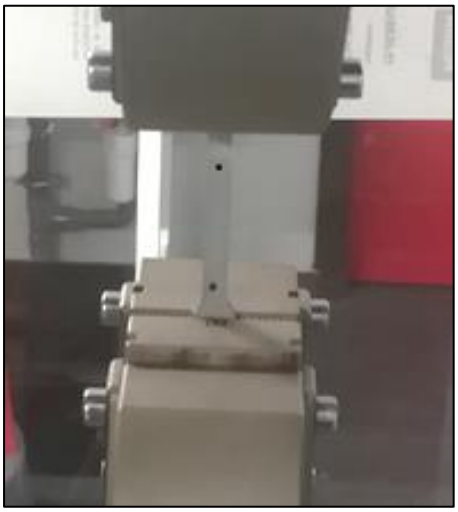


Figure 74: Eprouvette marquée et tenue dans la machine de traction

Le test se déroule comme suit :

- Charge de l'éprouvette jusqu'à 5 % de déformation plastique à la vitesse de 5*10^-4 /s
- Décharge de l'éprouvette à 20 % de la charge initiale
- Recharge de l'éprouvette jusqu'à sa rupture à la même vitesse.

Les résultats obtenus sont présentés dans les graphiques Figure 75, Figure 76 et Figure 77 sous forme de boîte à moustaches (Le Guen, 2002).

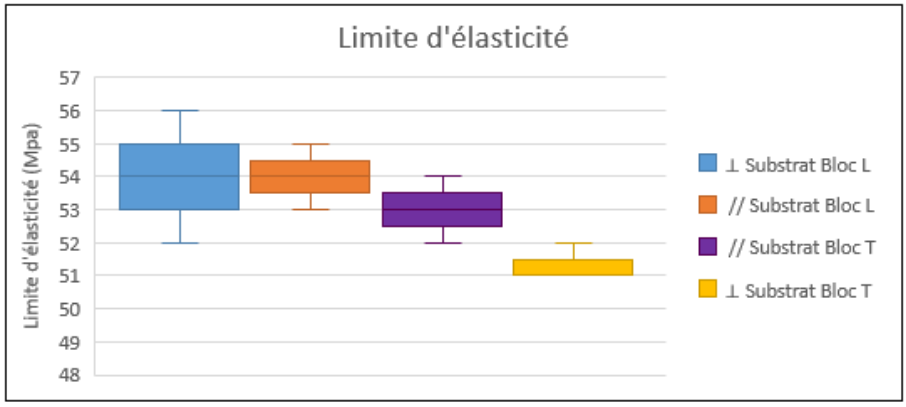


Figure 75 : Limite d'élasticité des éprouvettes extraites

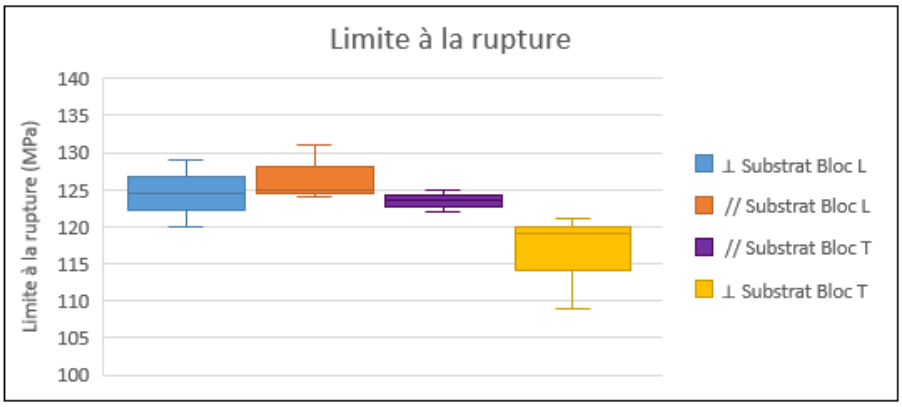


Figure 76 : Limite à la rupture des éprouvettes extraites

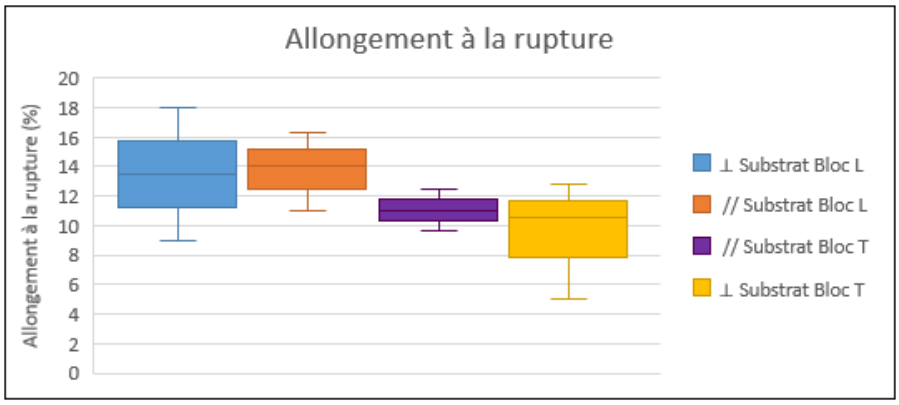


Figure 77 : Allongement à la rupture des éprouvettes extraites

Le résumé des résultats est présenté Tableau 9 :

Tableau 9: Récapitulatif des propriétés mécaniques des éprouvettes extraites

Eprouvettes	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	A (%)
⊥ Substrat Bloc L	54	124,5	13,5
// Substrat Bloc L	54	126,7	13,8
// Substrat Bloc T	53	123,5	11,1
⊥ Substrat Bloc T	51,33	116,33	9,5

Les propriétés mécaniques observées sont proches de celles annoncées dans la fiche technique du fil concernant la limite d'élasticité et la limite à la rupture (voir ligne MIG cordon du Tableau 10). L'allongement à la rupture est cependant bien plus faible (perte de 30 %).

II.2.3. Conclusion

Les résultats trouvés sont également plus faibles (de l'ordre de 20-25 %) que ceux avancés dans la littérature pour la réalisation de bloc en aluminium 4043 (Tableau 10). Les valeurs trouvées dans la littérature et écrites en rouge semblent aberrantes car trop éloignées des propriétés initiales du fil.

Tableau 10: Récapitulatif des propriétés mécaniques obtenus dans la littérature pour alliage d'aluminium 4043 (AlSi5)

Alliage	Condition	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	A (%)	Auteur
4043	CMT Advanced mur	-	169	21	(Nie et al., 2018)
	CMT horizontal mur	-	260	13	(Zhao et al., 2017)
	CMT vertical mur	-	240	11,5	
	CMT Cylindre (mur)	-	164	12	(Pramod et al., 2020)
	CMT/CMTP mur	-	118	-	(Campatelli et al., 2020)
	MIG cordon	55	124	18	(Datasheet ESAB)
	MIG horizontal bloc	70	152	17	(Miao et al., 2019)
	MIG bloc	61	141	17	(Haselhuhn et al., 2016)
	CMTP bloc	-	169	-	(Liu et al., 2020)
	CMT bloc	137	215	11	(Su et al., 2021)
	CMTPA bloc	**53**	**122,5**	**11,9**	**Ce manuscrit**

Aucune autre étude à laquelle comparer les résultats obtenus n'a été trouvée sur la réalisation d'un bloc avec la même synergie et le même matériau. Néanmoins, nos résultats correspondent à ceux pouvant être attendus au regard de la fiche technique du fil (Datasheet ESAB). Il est donc possible de faire des pièces convenables avec la méthode proposée.

Les propriétés mécaniques obtenues sont cependant en dessous de celles obtenues dans la littérature pour des blocs réalisés avec un mode CMTP et CMT. (Derekar et al., 2020) montrent qu'il est parfois plus intéressant de maximiser l'énergie développée afin d'améliorer la fluidité du bain de soudure et laisser les porosités s'échapper d'où l'utilisation de ces deux modes. Maximiser l'énergie massique apportée entraine une augmentation de la température du bain de fusion : cela peut engendrer des déformations et un changement de propriétés de l'alliage.

L'étude menée ici montre qu'il est possible de réaliser des blocs en utilisant une loi CMTPA. En effet, l'utilisation des paramètres EP/EN et la température de préchauffe et « d'interpass » ont permis cela. Ces leviers n'avaient pas été envisagés par (Cong et al., 2017).

II.3. Conclusion et perspectives

Au cours de ce chapitre les paramètres WFS ; WFS/TS et EP/EN ont pu être sélectionnés à partir de leur régularité et de leur mouillage à 150 °C ainsi que grâce à leur énergie massique pour une température de préchauffe à 150 °C. Une température « d'interpass » à 300 °C déterminée dans un second temps permet d'obtenir des cordons de même largeur pour les couches supérieures. Un ordre de dépose permettant d'optimiser le temps d'attente entre chaque cordon a été proposé. A partir du cordon sélectionné des surépaisseurs ont pu être ajoutées afin que les éprouvettes puissent être extraites au cœur des blocs, loin des instabilités de début et arrêt d'arc. La démarche entreprise a donc permis de réaliser des pièces massives ayant des propriétés mécaniques proches de celles annoncées par le fournisseur du fil.

Il serait pertinent d'analyser la santé matière des blocs réalisés au-delà des caractéristiques mécaniques (analyse de la microstructure, du taux de porosités). De plus, il serait intéressant de consolider les données obtenues concernant les caractéristiques mécaniques en réalisant un plus grand nombre d'éprouvettes de traction avec le mode CMTPA. Comparer les caractéristiques mécaniques ainsi consolidées avec celles d'un bloc réalisé avec la même stratégie mais en mode CMTA permettrait de comparer ensemble ces modes qui ont des caractéristiques proches et de conclure sur leur capacité à réaliser des pièces massives. En outre, la stratégie proposée peut être améliorée notamment par l'optimisation des débuts et fins de cordons. Enfin, un ordre de dépose a été proposé afin d'optimiser le temps d'attente entre chaque cordon. Le gain de temps par rapport à un empilement zigzag simple devrait être quantifié.

Le chapitre suivant présente un guide pour la sélection d'une technologie de mesure de contrainte pertinente et devant être insérée au cours de la réalisation d'une pièce massive.

Chapitre III : Sélection de capteurs de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM

L'objectif de ce chapitre est de répondre à la question de recherche suivante : Comment sélectionner un capteur de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM en fonction de ses caractéristiques et des spécifications du produit à rendre intelligent ?

III.1. Contexte et périmètre

Afin de réaliser une pièce intelligente par l'insertion d'un élément d'un système de mesure, il est nécessaire :

- De réaliser des pièces massives. Le chapitre précédent a montré la possibilité de réaliser des pièces massives en aluminium à l'aide de la technologie WAAM. Des pièces massives pourront donc accueillir un élément du système de mesure.
- De sélectionner un capteur à enfouir au sein de la pièce. Ce chapitre est dédié à l'établissement d'un guide de sélection du capteur à enfouir en fonction des conditions d'usage.

La bibliographie a montré que pour mesurer une information de contrainte, un capteur ne suffit pas. En effet, il est nécessaire d'utiliser une chaîne de mesure complète. Cependant, afin de rendre une pièce intelligente par insertion, il n'est pas nécessaire d'enfouir le système de mesure complet dans la pièce mais seulement le ou les éléments nécessaires à la captation du mesurande.

Il existe plusieurs technologies permettant de mesurer une contrainte reposant sur divers principes physiques et transformant de manière directe ou non le mesurande en grandeur électrique exploitable. Ces technologies de captations ont été présentées section I.2.2 du chapitre bibliographique. Cependant, sans protections spécifiques, elles pourraient être détériorées par le procédé WAAM au cours de leur insertion.

En effet, le procédé de fabrication WAAM crée un environnement très hostile pour tout dispositif devant être inséré. Ainsi, l'élément noyé subit au cours du processus d'insertion une proximité avec l'arc de soudure qui est d'une intensité de plusieurs centaines d'ampères et d'une température de plusieurs milliers de degrés. Le capteur a également une proximité avec du métal en fusion, ayant une température de plusieurs centaines de degrés Celsius. Ce matériau est un conducteur électrique et thermique de l'énergie et de la chaleur apportée par l'arc de soudure. Il subit en outre de fortes contraintes résiduelles créées par les gradients thermiques imposés au cours du procédé de fabrication.

Afin de choisir une technologie de mesure à insérer au cours du procédé WAAM, il faut certes prendre en considération les paramètres liés à son insertion mais également les paramètres liés à son utilisation au cours de l'usage de la pièce intelligente. Ainsi, les spécifications de la pièce hôte qui doit être rendue intelligente doivent être pris en compte.

Ce chapitre présente quatre familles de dispositif de mesure pouvant mesurer une contrainte et étant insérable au cours du procédé WAAM. Un guide de sélection permettant d'évaluer ces technologies et de choisir la plus adaptée aux spécifications de la pièce hôte à rendre intelligente est également proposé. Ce guide de sélection est mis à l'épreuve sur divers exemples de pièces réalisables avec la technologie WAAM et ayant un intérêt à être conçues en tant que pièces intelligentes.

III.2. Guide et critères de sélection

III.2.1. Choix de l'outil de sélection

Divers outils de sélection ont été présentés section I.2.3 et leurs principales caractéristiques ont été identifiées.

L'objectif du guide de sélection est d'établir un classement des technologies de capteur et la chaîne de mesure associée. Ce classement doit prendre en considération les capacités d'insertion de la technologie au cours du procédé WAAM ainsi que les spécifications de la pièce. Ce guide doit pouvoir être utilisé suffisamment tôt au cours du processus de conception du produit.

La méthode Electre, n'est pas retenue, en effet, elle ne permet pas d'obtenir une solution unique.

La méthode AHP (ou AMCH) nécessite une classification des différents critères, qui doit être établie pour les critères d'enfouissement et pour ceux liés au cas d'usage par une comparaison 2 à 2. Ce processus est jugé trop fastidieux vis-à-vis des objectifs énoncés. De plus, seuls les sous-critères ayant le poids le plus important sont considérés dans le calcul de la note finale. Cette méthode n'est donc pas retenue.

Enfin, les méthodes WSM et WPM permettent d'obtenir des solutions uniques, à partir d'une pondération des critères. Cette pondération est établie de manière définitive pour les critères d'enfouissement et seuls les critères liés au cas d'usage doivent être établis lors du processus de conception. La méthode WPM a l'intérêt d'être rédhibitoire pour les solutions ayant un critère nul. Les solutions étudiées sont toutes adaptées à l'enfouissement donc elles ne devraient pas être exclues du fait d'un critère, donc la méthode WPM semble peu intéressante. En revanche, un mauvais score sur un critère doit pouvoir être compensé sur un autre.

Ainsi, la méthode WSM est choisie pour le guide.

Voici comment elle s'utilise :

1- Etablissement d'une liste de critères permettant d'évaluer un système de mesure de contrainte pour rendre une pièce WAAM intelligente par insertion d'un de ses éléments
2- Evaluation pour chaque critère énoncé de la capacité d'un système de mesure donné associé à une technologie à rendre une pièce WAAM intelligente par enfouissement d'un de ses éléments ($Score_{Techno}$)
3- Evaluation de l'importance de chacun de ces critères par rapport aux spécifications d'une pièce WAAM intelligente à réaliser ($Poids_{Pièce}$)
4- Calcul par somme pondérée (Figure 78) de la note du système de mesure associé à une technologie dont au moins un élément est à enfouir pour rendre intelligente une pièce WAAM considérée

Les systèmes de mesure sont évalués dans leur capacité à répondre aux critères proposés via la grille de notations suivante (1 : médiocre ; 3 : passable ; 7 : bien ; 9 : excellent). Les notes attribuées le sont pour le groupe de technologies à classer. Cette notation devra donc être réévalué lors de l'ajout ou la suppression d'une technologie à classer.

Les poids donnés à ces critères en fonction des spécifications d'une pièce WAAM hôte donnée suivent la même échelle d'appréciation.

Critères i	Poids Pièce A : P_i^A	Score Techno1 S_i^1	Score Techno2 S_i^2	…
1 Prétraitement	9	9	1	
2 Compacité	3	7	3	
3 Précision	…	…	…	
4 Etendue				
5 Communication				
6 Conditionnement				
7 Autonomie				
8 Coût				
9 Robustesse				
10 Mesurandes Sup.				
Note insertion Techno j dans Pièce k : $N_{jk} = \sum_i P_i^j . S_i^k$		$N_{A1} = \sum_i P_i^A . S_i^1$	$N_{A2} = \sum_i P_i^A . S_i^2$	…

Figure 78 : Calcul par somme pondérée des notes des différentes technologies pour leur insertion dans une pièce donnée

Les scores et poids peuvent être attribués par une évaluation réalisée par un panel d'experts. Ils sont attribués dans la suite de ce chapitre par l'auteur.

III.2.2. Critères de sélection

Divers critères sont listés dans le Tableau 11 pour évaluer la capacité d'un système de mesure donné, à rendre intelligente une pièce WAAM, par insertion d'un élément du système au cours de la fabrication de la pièce.

Tableau 11 : Description des critères d'évaluation d'un système de mesure

	Critères d'évaluations pour insertion
1	Simplicité du prétraitement pour insertion durant le procédé WAAM (9=très simple)
2	Compacité des éléments à insérer (9 = très compact)
3	Précision après insertion (9 = très précis)
4	Etendue de mesure après insertion (9 = grande étendue)
5	Facilité de communication du signal à travers la pièce (9 = très facile)
6	Facilité du conditionnement du signal (9 = très facile)
7	Autonomie/Portabilité (9 = très facile à rendre autonome/portable)
8	Accessibilité économique (9 = faible cout)
9	Robustesse de la technologie de mesure après enfouissement (9 = très robuste)
10	Mesurandes supplémentaires (9 = nombreuses)

Le premier critère évalue la technologie de mesure considérée par rapport au nombre d'étapes de préparation nécessaires pour l'insérer au cours du procédé WAAM. C'est par exemple le nombre de couches protectrices dont elle doit être recouverte, ou la surface totale à protéger.

Le critère suivant évalue la compacité de la solution et notamment le volume total inséré dans la pièce hôte. Cela peut être également le nombre de couches, de cordons nécessaires pour recouvrir complètement le capteur.

Le troisième critère « Précision » évalue l'exactitude (fidélité + justesse) et la résolution de la technologie de mesure une fois insérée.

L'étendue de mesure de la technologie une fois insérée est évaluée. Celle-ci est déterminée principalement par la contrainte à la rupture de l'élément inséré.

La facilité de communication du signal évalue la transmission du signal hors de la pièce hôte. Il peut s'agir d'une transmission du signal par des fils partiellement enfouis ou d'une transduction à distance par génération d'un champ intermédiaire. La technologie réalisant la communication au travers de la pièce peut nécessiter des conditions spécifiques de fonctionnement et imposer des critères géométriques ou de choix de matériau que la pièce doit respecter.

La simplicité du conditionnement du signal est ensuite évaluée. Il s'agit notamment du nombre d'éléments qui permettent de traduire le signal obtenu par le capteur en mesure de contrainte.

La portabilité/autonomie de la solution est le critère d'évaluation suivant. Cela consiste à compter les éléments de la chaine de mesure qui sont miniaturisables et adaptables à une solution où la pièce est mobile. La possibilité d'insérer un système de transfert de donnée sans fil (Karray et al., 2018) est également évaluée. L'enjeu est que la pièce intelligente puisse faire partie d'un réseau de capteurs (Gupta, 2013). En résumé, c'est la complexité de créer un système embarqué qui est évaluée.

Le critère suivant évalue le coût global de la solution. Les opérations de prétraitement ainsi que l'ensemble des éléments de la chaîne de mesure sont pris en compte.

La robustesse de la technologie de mesure une fois insérée est également évaluée. L'influence du milieu extérieur sur la qualité de la mesure est évaluée dans ce critère.

Enfin, la capacité de la technologie à mesurer plus qu'une contrainte uni-axiale est considérée dans l'évaluation de la technologie : par exemple la température ou la contrainte suivant différentes directions.

Le paragraphe suivant propose une évaluation de quatre technologies de capteurs vis-à-vis de ces critères.

III.3. Présentation et évaluation de capteurs de chaque famille

Dans la section I.2.1.2 du chapitre bibliographique, une classification des capteurs a été proposée. Celle-ci permet d'avoir une homogénéité des technologies de capteur au sein d'une même famille vis-à-vis des critères d'évaluation. Dans cette section, pour chaque famille, un état de l'art sur l'insertion de capteurs dans des pièces au cours de leur processus de fabrication additive métallique est présenté, puis une technologie de capteur représentative de la famille est présentée et évaluée vis-à-vis des critères précédemment établis.

III.3.1. Capteurs complètement enfouis

Les premiers capteurs de contrainte à évaluer dans leur capacité à être enfouis sont ceux qui doivent être complètement enfouis, donc notamment les capteurs à transformation directe et les capteurs à transformation indirecte en contact avec leur corps d'épreuve.

III.3.1.1. Etat de l'art sur l'insertion de capteur dans des procédés de fabrication additive métallique

Des capteurs à transformation directe ont déjà été insérés dans des procédés de fabrication additive métallique. (Li et al., 2000) et (Choi et al., 2006) ont ainsi introduit, durant un procédé de fabrication SLM de pièces en acier inoxydable, des jauges d'extensométrie de type « film fin déposé sous vide ». Ces jauges étaient encapsulées par de nombreuses couches protectrices (Figure 79) :

- Une entièrement en alumine (Li et al., 2000) puis une triple couche ou l'alumine entoure une couche de nitrure de silicium (Si_xN_y) (Choi et al., 2006) pour isoler électriquement le capteur
- Une en cuivre pour réduire le gradient thermique et les contraintes résiduelles induites

- Une en nickel pour promouvoir l'adhésion avec la pièce hôte en acier inoxydable

(Cheng et al., 2007) et (Zhang et al., 2006) montrent que des thermocouples déposés sous vide et réalisés avec la même protection peuvent être insérés dans des procédés de soudure ultrasonique.

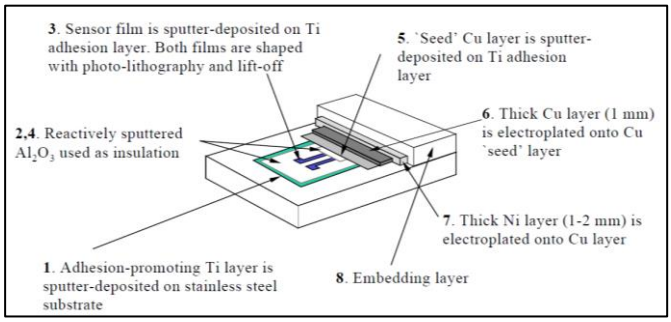


Figure 79 : Couches de protection pour l'insertion d'une jauge de contrainte durant un procédé SLM en acier inoxydable (Li et al., 2000)

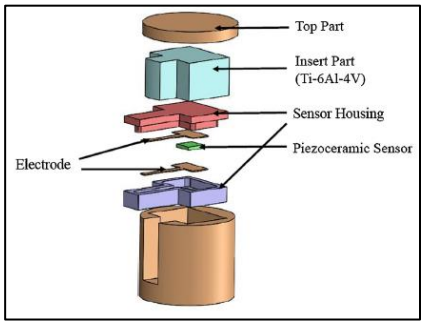


Figure 80 : Pièce intelligente réalisée en deux étapes par procédé EBM (Hossain et al., 2016)

(Hossain et al., 2016) ont introduit un capteur piézo-électrique en tant que capteur de pression durant un procédé EBM. Ils ont réalisé une encapsulation du capteur en céramique plutôt qu'en alumine (Figure 80). Cela permet d'éviter tout effet de métallisation à la surface de l'alumine qui amoindrie sa capacité d'isolation électrique.

(Töppel et al., 2018) insèrent dans un procédé de fabrication LBM d'une pièce en titane un élément pouvant servir d'actionneur ou de capteur. Il s'agit d'un dispositif piézoélectrique relié à une bobine et protégé par une encapsulation céramique et métallique. Lorsque le système fonctionne comme un capteur, l'élément piézo-électrique alimente la bobine enfouie avec lui qui modifie un champ magnétique généré par une bobine externe qui transmet ainsi le signal du capteur enfoui.

Les capteurs ont été insérés dans des procédés de fabrication additive utilisant de l'acier dont la température de solidus est au-delà des 1000 °C. Les procédés utilisés sont de type « lit de poudre » la profondeur de fusion est donc faible (quelques centaines de microns). Ainsi les couches protectrices utilisées par les auteurs sont efficaces tout en restant fines. La technologie WAAM impose des profondeurs de fusion de plusieurs millimètres. Si cette technologie de capteur est utilisée, la couche protectrice doit être importante. Cela peut nuire à la transmission, des efforts et donc des contraintes, de la pièce jusqu'au capteur.

Les jauges d'extensométrie semblent donc particulièrement adaptées à l'insertion en WAAM. C'est celles-ci qui seront décrites et évaluées dans les deux sections suivantes.

III.3.1.2. Présentation des jauges d'extensométrie

Les jauges d'extensométrie sont des capteurs extrêmement répandus. Elles mesurent la déformation d'une pièce à travers la variation de résistance d'un circuit. La résistance globale d'un circuit électrique dépend, entre autres, de sa longueur. Une jauge d'extensométrie présente un circuit électrique imprimé sur un support suivant un motif particulier qui maximise la longueur du circuit dans une direction donnée. La variation de résistance du circuit, et donc la sensibilité de la jauge, est maximale lorsque la déformation de la pièce transmise au support, et donc au circuit de la jauge, est suivant la direction privilégiée du circuit. Les jauges de contrainte les plus couramment rencontrées sont des jauges à trames pelliculaires (Figure 82).

Une jauge de contrainte est montée en quart de pont de Wheatstone afin que la tension mesurée soit proportionnelle à $\Delta R/R$ (Figure 81). Ce type de jauge peut être montée avec 3 autres jauges sous la forme d'un pont de Wheatstone complet pour compenser les variations de température et prendre en compte la compression lors des mesures de flexion. Elles peuvent également se

regrouper par 3 sous la forme de rosette et permettent d'avoir des informations de déformation suivant plusieurs axes dans un plan donné (Figure 83).

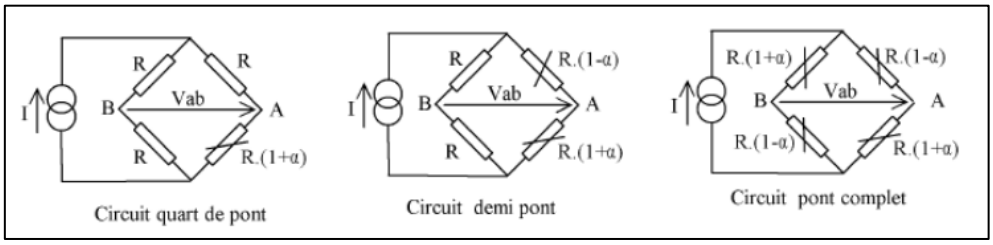


Figure 81 : Montage de pont de Wheatstone en fonction du nombre de jauge (Bennour, 2016)

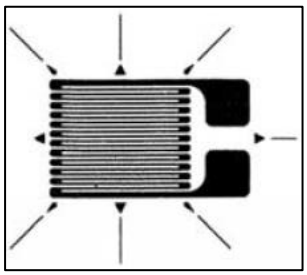


Figure 82 : Jauge de contrainte pelliculaire unidirectionnelle (Parmantier and Kratz, 2009a)

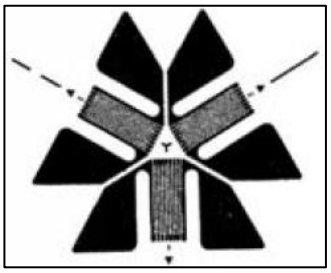


Figure 83 : jauge de contrainte pelliculaire en rosette (Parmantier and Kratz, 2009a)

III.3.1.3. Evaluation du contrôle de la contrainte par enfouissement de jauge d'extensométrie

Les jauges d'extensométrie sont des capteurs de déformation communs, facile d'utilisation, très répandus et peu onéreux. Présentées sous la forme de rosette, elles permettent de mesurer les déformations dans un plan donné. Elles peuvent être utilisées pour les tests de traction et ont une grande étendue de mesure.

Cependant, elles sont composées de circuits électriques fragiles qu'il est nécessaire de protéger d'un point de vue électrique et thermique pour qu'elles soient insérées au cours du procédé WAAM. En outre, plus les couches de protection réalisées sont nombreuses et épaisses, plus la précision de la mesure est affectée car le transfert de la déformation de la pièce vers la jauge est affaibli.

Il est de plus nécessaire d'intégrer de la connectique pour pouvoir alimenter la jauge et récupérer le signal de mesure. Il faut protéger cette connectique de la même manière que la jauge insérée. Cela augmente donc le volume total à insérer.

De plus, il faut donc que les surfaces de la pièce hôte par lesquelles les connectiques sortent soient accessibles au branchement pour l'alimentation et la mesure. La connectique sortante est également un point de fragilité de l'ensemble.

Le signal récupéré est une tension et nécessite l'application d'un gain et d'un filtre passe bas pour représenter la grandeur mesurée et éliminer les bruits.

La réalisation d'une solution embarquée est possible par l'utilisation d'une batterie délivrant une tension appropriée, d'un circuit conditionneur comprenant des éléments permettant de réaliser des opérations d'amplification, de linéarisation et de filtrage (réalisable par exemple via un amplificateur opérationnel) et un CAN relié à un élément de communication sans fil. Ces éléments doivent pouvoir être protégés et rattachés à la pièce hôte afin que la mesure puisse être communiquée à une centrale d'acquisition au cours de l'utilisation de la pièce.

Les jauges à trame pelliculaire ont donc été évaluées conformément au Tableau 12.

Tableau 12 : Evaluation suivant les critères sélectionnés des jauges de contraintes

Critère	Note	Justification
1 Prétraitement	1	Couche protectrice thermique + couche isolation électrique (jauge + connectique)
2 Compacité	1	Volume jauge protégé + volume connectique
3 Précision	3	Perte de précision (exactitude, résolution) à travers la double couche
4 Etendue	9	Grande étendue (Utilisée pour tests de traction/ fragilisée par la nature des couches ?) Dépend de l'élasticité de la couche
5 Communication	7	Connectique + générateur
6 Conditionnement	9	Gain + pont de Wheatstone
7 Autonomie	9	Portabilité possible pour le générateur et envoi sans fil car signal électrique
8 Coût	9	Cout faible (double protection peut être chère)
9 Robustesse	1	Connectique = point de fragilité
10 Mesurandes Sup.	3	Contrainte multi axiale (rosette)

III.3.2. Capteurs nécessitant un guide d'onde

Les capteurs nécessitant un guide d'onde entre le transducteur électrique et le corps d'épreuve sont évalués. De nombreux capteurs à fibre optique font partie de cette catégorie. L'article de revue de (Saheb and Mekid, 2015) montre que leur insertion dans des pièces métalliques a été grandement étudiée. Les fibres à réseau de Bragg (FBG) sont présentées plus en détail par la suite.

III.3.2.1. Etat de l'art sur l'insertion des Fibres à réseau de Bragg

De nombreux auteurs ont étudié l'insertion de fibre de Bragg au cours de procédé de fabrication additive métallique ou au cours de soudure métallique. Ainsi, (Li et al., 2000) et (Havermann et al., 2014) ont inséré des fibres de Bragg au cours de la réalisation de pièces en inox par procédé SLM (Figure 84). (Alemohammad et al., 2007) ont réalisé des outils de coupe intelligents en insérant une fibre de Bragg sur un outil de coupe en la recouvrant de nickel par électrodéposition.

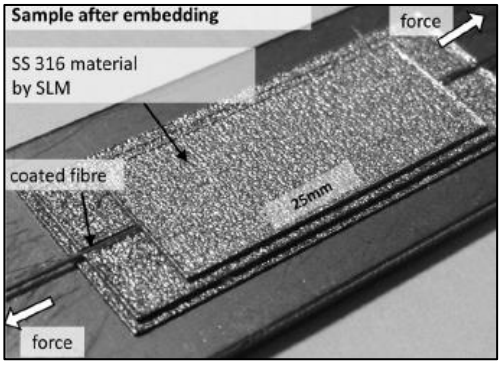


Figure 84 : Fibre de Bragg insérée au cours d'un procédé SLM inox (Havermann et al., 2015)

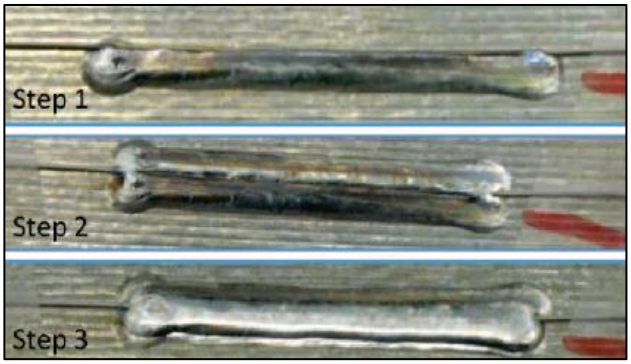


Figure 85 : Fibre de Bragg insérée au cours d'une soudure laser étain (Grandal et al., 2018)

(Grandal et al., 2018, 2016) ont étudié l'insertion de fibre de Bragg au cours de soudure TIG ou Laser avec un fil d'apport en étain (Figure 85). Ils ont testé leur sensibilité à la déformation et à la température.

Des fibres à réseau de Bragg ont également été insérées au cours de soudage ultrasonique sur un substrat aluminium avec un alliage étain-bismuth (Zhang et al., 2019).

De nombreux auteurs ont proposé des modèles mathématiques permettant d'évaluer la sensibilité de la fibre de Bragg aux déformations en fonction des matériaux composant ses couches

protectrices (Kim, 2017; Zhang et al., 2013). Des études ont également montré la sensibilité de la fibre aux gradients de température prouvant ainsi qu'elle pouvait être également utilisée en tant que capteur de température (Feng et al., 2010).

Ces différentes études permettent de réaliser l'évaluation de cette solution.

III.3.2.2. Présentation des fibres à réseau de Bragg

Les fibres à réseau de Bragg sont un exemple de famille de capteurs à fibre optique de déformation.

Une fibre optique est un guide d'onde lumineuse composé d'un cœur et d'une gaine optique. Les ondes lumineuses sont guidées dans le cœur de la fibre et se reflètent à l'interface entre le cœur et la gaine. Les fibres à réseau de Bragg sont des fibres optiques dont l'indice de réfraction du cœur a été modifié en un ou plusieurs endroits pour correspondre à un réseau de Bragg.

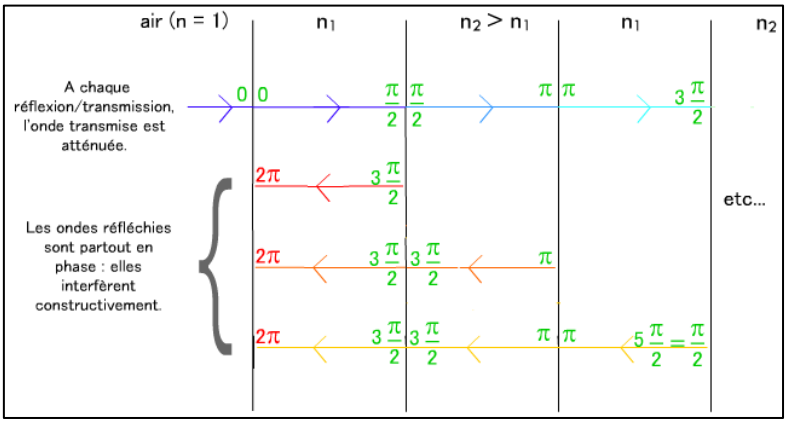


Figure 86 : Déphasage induit à chaque interface dans un réseau de Bragg (Wikimedia Commons)

Un réseau de Bragg (Figure 86) est un empilement de couches de matériau d'indice de réfraction différents espacées d'une longueur spécifique appelée longueur de Bragg, qui se comporte comme un filtre coupe bande en transmission et passe bande en réflexion vis-à-vis du spectre lumineux incident (Figure 87). Ainsi, seul un spectre centré autour d'une longueur d'onde spécifique définie par le pas du réseau est reflété. Plusieurs réseaux différents peuvent être inscrits sur une même fibre.

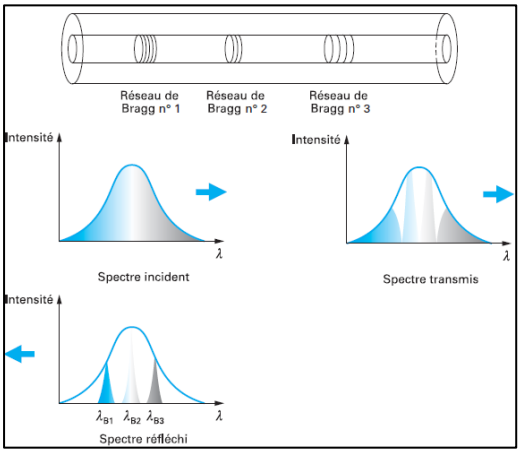


Figure 87 : Spectres réfléchis et transmis par une fibre inscrit avec trois réseaux de Bragg (Ferdinand, 2018)

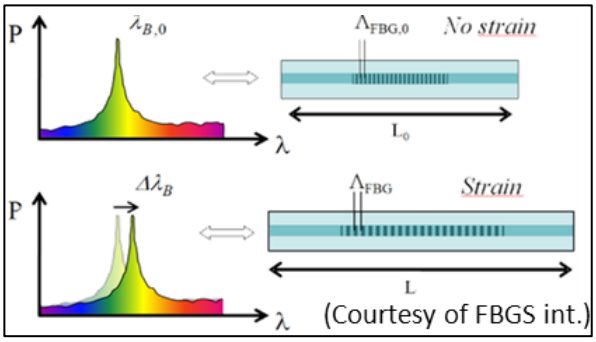


Figure 88 : Décalage de la longueur d'onde reflété dû à la déformation de la fibre de Bragg (Luyckx et al., 2015)

Lorsqu'une fibre de Bragg est déformée dans sa longueur, le pas du réseau est également modifié et donc la longueur d'onde centrale $\lambda_b$du spectre réfléchi est modifiée (Figure 88). Ce décalage

de la longueur d'onde du spectre réfléchi permet de renseigner la déformation subie localement par le réseau de Bragg.

Il faut un analyseur de spectre permettant de décomposer le signal lumineux et de transformer chaque intensité lumineuse pour une longueur d'onde donnée en signal électrique. L'analyseur de spectre est un élément qui fait office avec le laser de transducteur mais également de conditionneur et d'élément de traitement du signal.

III.3.2.3. Evaluation du contrôle de la contrainte par enfouissement de fibre à réseau de Bragg

Une fibre optique est réalisée en silice, elle nécessite donc une couche de protection thermique qui réalise également l'adhésion avec le matériau métallique de la pièce hôte.

Un réseau de Bragg est un capteur très précis qui peut mesurer des déformations très faibles de l'ordre du $\mu\epsilon$ mais qui n'a pas une grande étendue de mesure car une fibre optique se casse au-delà de 1 % de déformation.

C'est une solution relativement volumineuse car il est nécessaire de protéger la partie active mais également la partie passive de la fibre pour son insertion. Cependant les fibres ont un rayon relativement fin, il est donc possible de les insérer en peu d'étapes de soudage.

Pour utiliser ce capteur, il est nécessaire d'utiliser un laser pour générer le signal optique et un analyseur de spectre pour récupérer l'information de déformation et donc de contrainte. Ces deux éléments sont difficiles à miniaturiser et à fixer à la pièce hôte pour rendre la solution portable.

De plus, l'ensemble de ces éléments, fibre de Bragg protégée, analyseur de spectre, laser, représente un coût d'achat important.

Un capteur à fibre de Bragg est plus indiqué pour être intégré au sein de pièce longiligne. En effet, une fibre de Bragg accepte difficilement un faible rayon de courbure. De plus, il est possible d'inscrire plusieurs réseaux de Bragg sur une même fibre et ainsi d'optimiser le nombre d'informations obtenues par rapport au volume de fibre inséré, au volume total inspecté, et au montant financier dépensé pour inspecter un volume donné.

Il est nécessaire que la pièce hôte ait un design qui permette d'avoir accès à l'entrée et à la sortie de la fibre, des points cruciaux qui représentent des fragilités pour l'ensemble pièce-capteur. De plus, la partie passive de la fibre qui sert seulement de guide d'onde est également un point de fragilité. Plus celle-ci est importante, plus le risque de défaillance prématurée est important. Un soin particulier doit donc être apporté lors de son insertion pour que celle-ci ne limite pas grandement la durée de vie de la solution globale.

Le Tableau 13 présente l'évaluation de cette technologie suivant les critères présentés au paragraphe 2.2.

Tableau 13 : Evaluation suivant les critères sélectionnés des capteurs à fibre de Bragg

Critère	Note	Justification
1 Prétraitement	3	Couche simple
2 Compacité	3	Fibre optique protégée à recouvrir (partie active et partie transporteuse)
3 Précision	9	Très précis mais mesure de faible déformation (perte à travers la couche)
4 Etendue	1	Faible étendue (Moins de 1 % avec couche protectrice)
5 Communication	3	Laser + fibre transporteuse + Pièce longue préférable + accès aux entrée/sortie de la fibre

6 Conditionnement	1	Spectre optique à analyser (longueur d'onde du pic à identifier)
7 Autonomie	1	Analyseur de spectre non portable
8 Coût	1	Laser, Fibre de Bragg, Analyseur de spectre → très cher
9 Robustesse	3	Fragilité au point d'entrée et de sortie
10 Mesurandes Sup.	9	Mesure multipoint + Température

III.3.3. Transducteurs mesurant une dimension

Certaines technologies permettent de recréer la forme d'un corps enfoui par imagerie. Dans cette catégorie un transducteur externe permet de distinguer un témoin enfoui dans la pièce hôte à travers la matière. La contrainte est déduite de la variation des dimensions du témoin, mesurées par imagerie.

Ces technologies sont utilisées pour le contrôle non destructif de pièces et permettent originellement de repérer et mesurer des défauts dans des pièces (normes ASTM pour CND de pièces AM en aéronautique : WK47031 et normes ISO pour CND de pièces AM : ISOTC261JG59). C'est pourquoi l'état de l'art n'aborde que leur utilisation dans le contrôle non destructif de pièces réalisées avec la technologie WAAM. Utiliser ces technologies pour mesurer une contrainte grâce à un témoin enfoui reste un concept. La taille du témoin à enfouir doit être adaptée à la résolution spatiale de la technologie utilisée et à la précision minimale souhaitée. Le matériau du témoin doit être également choisi au regard de sa compatibilité avec la pièce hôte et avec la technologie de détection considérée.

Un seul exemple est présenté ici, celui de la détection ultrasonore. Elle ne doit pas être confondue avec la détection acoustique qui consiste à analyser les ondes mécaniques acoustiques produites dans une pièce par la création de fissures ou de défauts. La détection ultrasonore consiste à transmettre une onde ultrasonore à la pièce inspectée et à analyser comment cette onde est modifiée en traversant la pièce. Seule l'inspection par émetteur piézo-électrique est considérée pour la suite.

III.3.3.1. Etat de l'art de l'imagerie dans le contrôle non destructif de pièces réalisées par le procédé WAAM

(Lopez et al., 2018) évaluent la capacité de cette technologie avec un capteur mono-élément sur des blocs WAAM réalisés en aluminium et en acier. La forte sinuosité des pièces brutes réalisées en WAAM rend leur inspection complexe. Il remarque que lorsqu'un défaut est trop important, il réfléchit l'ensemble des ultrasons à son interface, les éventuels défauts se trouvant au-delà ne sont pas détectés car non atteint par les ultrasons. L'inspection par ultrason mono-élément montre ainsi une de ses limites.

(Yaacoubi et al., 2014) réalisent des soudures en matériaux ferromagnétiques. Cela permet d'utiliser les propriétés magnétostrictives de la soudure réalisée pour faire un contrôle non destructif par détection Electro-Magnéto-Acoustique (EMA). Ce sont des premiers exemples de soudures intelligentes utilisées en tant qu'éléments de capteur.

La littérature existante sur la détection de défauts par sonde multiéléments dans des pièces réalisées par procédé WAAM est résumée dans le Tableau 14:

Tableau 14 : Etat de l'art du contrôle de pièce WAAM par méthode PAUT

Auteur	Type de détection	Surface	Matériau	Type de défaut	Taille des défauts
(Chauveau, 2018; Chauveau et al., 2014)	Contact	Usinée	Acier	Fente	0,1 mm? (<2 mm)
(Bacelar, 2017)	Contact	Usinée & substrat	Acier	Manque de fusion	Pas mesurée (~1 mm)
(Javadi et al., 2019b)	Contact	Usinée	Acier	Perçage et inclusion	0,5 mm?
(Javadi et al., 2019a)	Contact	Usinée	Aluminium	Perçage	0,5 mm
(Chabot et al., 2020)	Immersion (Figure 89)	Usinée	Aluminium	Perçage	0,6 mm
(Sousa et al., 2019)	Immersion	Brut	Aluminium	Perçage	2 mm
(Zimermann et al., 2021)	Contact (Figure 90)	Brut	Titane	Perçage et manque de fusion	0,5 mm

Ainsi la taille des plus petits défauts détectés renseigne sur la résolution de cette technologie. Lorsque le défaut est une inclusion et non un perçage, le signal de l'écho renvoyé est fortement diminué. Cela peut s'optimiser en choisissant le matériau du corps inclus à partir de son impédance acoustique. De plus, avoir une surface plane d'inspection pour détecter les défauts n'est pas une nécessité. Cependant, cela facilite la mise en place du procédé et peut améliorer la précision de mesure. (Zimermann et al., 2021) à l'aide des méthodes FMC, TFM et SAFT, arrive à reconstruire la surface supérieure d'un mur avec une erreur de 0,04 mm par rapport à la géométrie obtenue par un scanner 3D. Cette précision beaucoup plus importante s'explique notamment par le changement abrupt des propriétés matériau entre la sonde et le mur.

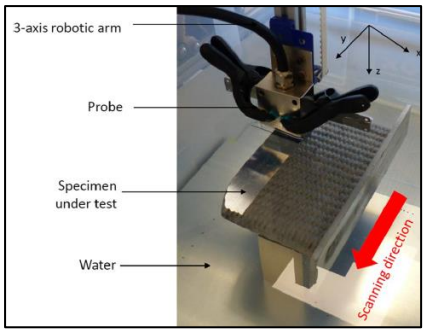


Figure 89 : Inspection ultrason par immersion d'un mur WAAM partiellement usiné (Chabot et al., 2020)

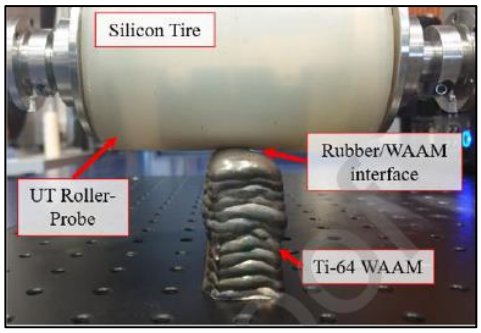


Figure 90: Inspection d'un mur WAAM non usiné par sonde souple (Zimermann et al., 2021)

Afin de comprendre les enjeux autour de l'imagerie par détection ultrasonore, celle-ci est présentée plus en détail à la section suivante.

III.3.3.2. Présentation de l'inspection ultrasonore multiéléments (fonctionnement par capteur piézo-électrique)

La détection ultrasonore multiéléments est une technologie très répandue dans le contrôle non destructif des soudures et reprend le principe de l'échographie médicale. Une onde est envoyée dans la pièce à inspecter via un palpeur et celui-ci analyse l'amplitude et le délai des échos renvoyés par la pièce. Ceux-ci traduisent les diverses interfaces et porosités incluses dans celle-ci. A l'aide des lois de propagation des ondes mécaniques dans les métaux, il est possible de déterminer la distance et la taille des défauts présents dans une pièce (Figure 91 et Figure 92).

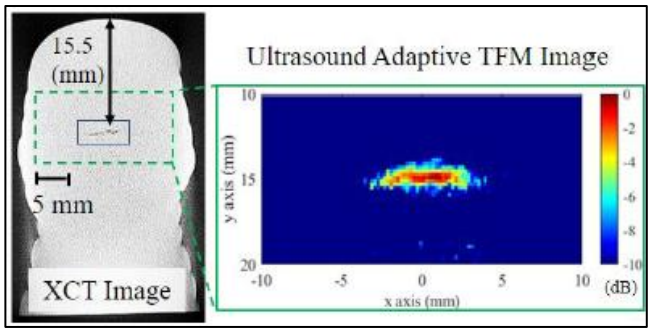


Figure 91 : Détection par sonde multiéléments de défauts dans un mur titane fait en WAAM (Zimermann et al., 2021)

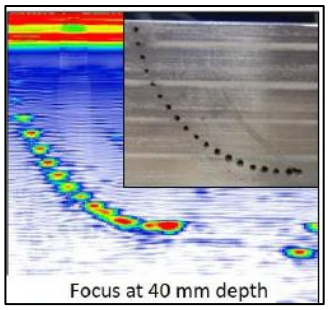


Figure 92 : Détection par sonde multiéléments de perçages dans un mur aluminium fait en WAAM (Javadi et al., 2019a)

Ces lois peuvent également être utilisées pour déterminer la présence d'inclusions, de corps ayant des propriétés mécaniques différentes qui ralentissent ou favorisent la propagation des ondes. En effet, la vitesse de propagation d'une onde dans un matériau ainsi que son atténuation dépendent du module de Young, du coefficient de poisson et de la masse volumique du matériau dans lequel elle se propage.

Les sondes multiéléments regroupent plusieurs éléments piézoélectriques émetteurs et récepteurs sur un même palpeur. Cette technologie permet donc d'avoir une analyse plus fine d'une pièce. Des méthodes d'inspection et de reconstruction tels que FMC, TFM et SAFT, permettent d'optimiser l'usage de ces sondes et de reconstruire une image de la structure interne d'une pièce à partir des échos réceptionnés. Le contact entre la pièce et la sonde doit être un point d'attention important pour assurer la qualité de la détection. Ainsi utiliser une surface plane ou usinée, et un gel ou un matériau permettant d'améliorer le couplage et si nécessaire le déplacement entre la sonde et la pièce sont autant d'actions permettant de faciliter la mesure et d'améliorer sa précision.

L'usage d'une telle méthode pour mesurer un témoin enfoui permettrait ainsi de contrôler sa déformation et donc la contrainte qu'il subit si l'inspection utilisée permet d'avoir une résolution spatiale suffisante.

III.3.3.3. Evaluation du contrôle par inspection ultrasonore multiéléments

Afin d'utiliser cette technique à des fins de mesure de contrainte, il est nécessaire d'augmenter la précision de détection. Cela peut être réalisé car la position du témoin et sa profondeur seront connues, ce qui n'est pas le cas des défauts à détecter en contrôle non destructif. Il est possible actuellement de détecter des défauts de 0,5 mm. Cette résolution permettrait de détecter une déformation de 0,1 % pour un témoin de 500 mm de long. En revanche, la précision revendiquée par (Zimermann et al., 2021) permet de mesurer une déformation de 0,01 % pour un témoin de 400 mm de long, ou une déformation de 0,1 % pour un témoin de 40 mm de long.

Si le témoin utilisé est assez fin, des phénomènes de diffraction peuvent apparaître et il convient alors d'utiliser la détection par méthode ToFD qui utilise les ondes diffractées pour repérer des défauts et des fissures (Baby et al., 2003).

Il a été montré que la nécessité d'avoir une surface d'inspection lisse peut être surpassée. Cependant la présence d'une couche couplante entre la sonde et la pièce reste nécessaire.

L'inspection ultrasonore multiéléments est cependant complexe et lourde à mettre en œuvre. Elle demande un temps important de calibration et de mise en place et le matériel d'analyse et d'imagerie est cher et volumineux. Réaliser une solution embarquée à partir de cette technologie semble difficile. Elle semble cependant adaptée aux technologies WAAM car elle a une profondeur

d'inspection relativement importante et ne nécessite pas l'insertion de connectique dans la pièce, seulement un témoin.

Cette utilisation d'un témoin permet également de changer à la marge la technique d'interrogation du témoin. Par exemple, si la surface ne peut être accessible, une interrogation par EMA ou par laser peut être réalisée.

Le Tableau 15 présente l'évaluation de cette technologie suivant les critères proposés section III.2.2.

Tableau 15 : Evaluation suivant les critères sélectionnés des technologies de CND par imagerie d'un témoin enfoui

Critère	Note	Justification
1 Prétraitement	7	Evacuation thermique dépend de l'épaisseur du témoin (à caractériser)
2 Compacité	9	Très compact car témoin fin
3 Précision	3	Pas vraiment déterminé (mais pas de perte car pas de protection)
4 Etendue	3	Dépend du matériau du témoin (allongement à la rupture)
5 Communication	7	Couplant + Sonde multiéléments + batterie + Témoin enfoui + Mouvement sonde + pièce au repos (pas de vibration parasites)
6 Conditionnement	1	Récepteur onde acoustique Système d'imagerie, identification changement de longueur
7 Autonomie	1	Générateur onde acoustique à rendre portable + Signal sans fil (après récepteur écho)
8 Coût	3	Imagerie chère
9 Robustesse	9	Correcte car complètement enfoui / surface contact émetteur/ possibilité de recalibrer/utiliser une autre technologie
10 Mesurandes Sup.	3	Image du témoin

III.3.4. Transducteurs mesurant une propriété intrinsèque strictive

Enfin les technologies pour lesquelles un transducteur contrôle à distance une propriété strictive d'un témoin enfoui dans la pièce hôte sont présentées. Comme pour la catégorie précédente, ce type de contrôle appliqué à un témoin de déformation présente un faible TRL et seule l'utilisation de ces technologies pour le contrôle non destructif de pièce en WAAM est présentée dans la section III.3.4.1. Le contrôle par induction d'un témoin magnétostrictif enfoui dans une pièce hôte est un type de contrôle de cette catégorie qui est présenté puis évalué par rapport aux critères présentés précédemment.

III.3.4.1. Etat de l'art de sondes inspectrices dans le contrôle non destructif de pièces réalisées par procédé WAAM

Le contrôle par courant de Foucault est utilisé dans le contrôle non destructif des soudures (Dumont-Fillon, 1996). Cette technologie a donc été également utilisée pour le contrôle de structures réalisées par procédé WAAM.

Ainsi (Bento et al., 2019) ont mis au point un système fonctionnant par courant de Foucault permettant de mettre en évidence la présence de défauts artificiellement implantés dans un mur en alliage d'aluminium réalisé par procédé WAAM à 2 mm de profondeur. Les défauts en question sont des perçages de 0,35 à 3 mm de diamètre. La sonde IOnic développée (Figure 93) pour réaliser ces tests permet de créer des courants de Foucault dans plusieurs directions et est ainsi très sensible. Elle est comparée à une sonde à courant de Foucault conventionnelle qui obtient de moins bons résultats.

(Bacelar, 2017) a mis au point un dispositif combinant une sonde à courant de Foucault et une sonde 4 pointes à chute de potentiel (Figure 94).

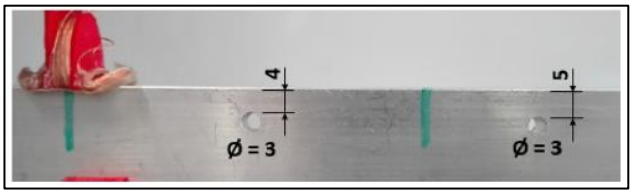


Figure 93 : Détection de défauts par sonde IOnic à courant de Foucault (Bento et al., 2019)

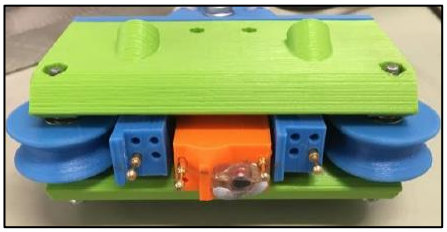


Figure 94 : Sonde à courant de Foucault et à chute de potentiel (Bacelar, 2017)

Pour la méthode des 4 pointes, un courant continu ou alternatif est généré par deux pointes A1 et A2 dans la pièce et la tension dans la pièce est mesuré entre deux pointes B1 et B2 (Figure 95). Une fissure entre les pointes de mesures rallonge les lignes de courant émises et se traduit dans la différence de potentiel mesurée.

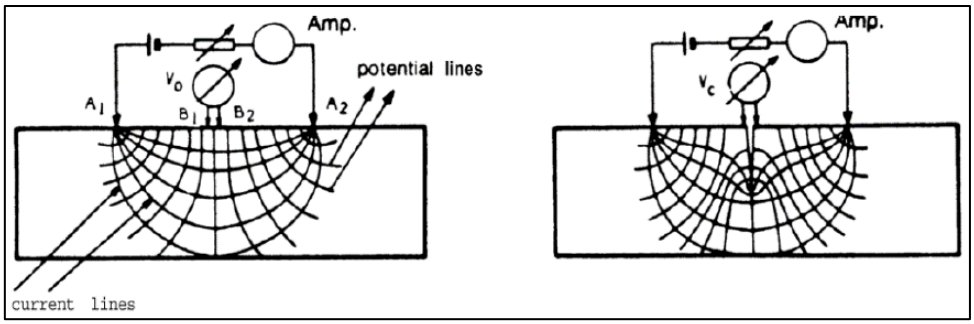


Figure 95: Mesure de chute de potentiel en courant continu par méthode des 4 pointes (Bacelar, 2017).

Il utilise la sonde sur des murs réalisés en WAAM avec des perçages faisant office de défauts artificiels devant être détectés par le dispositif. Le dispositif est placé sur la surface supérieure des murs aluminium pour maximiser la planéité de la surface en contact avec le dispositif et ainsi minimiser le bruit du signal. La sonde à courant de Foucault a ainsi pu détecter des défauts de 1,5 mm de diamètre à 2 mm de profondeur pour des fréquences d'alimentation allant de 1 à 7 kHz. Ce n'était pas le cas pour la sonde 4 pointes à chute de potentiel.

Les mesures par induction présentées dépendent des propriétés matériau. Certaines propriétés matériau étant strictives, elles peuvent être utilisées comme marqueurs de la contrainte subie. La perméabilité magnétique est une de celles-ci via le phénomène de magnétostriction. Elle est détaillée dans la section suivante.

III.3.4.2. Présentation du contrôle par induction de la perméabilité relative d'un témoin magnétostrictif

L'enjeu ici est de contrôler par induction la contrainte subie par un témoin ferromagnétique enfoui. Cela se fait via la variation de perméabilité magnétique du témoin et par effet magnétostrictif inverse.

La magnétostriction est la propriété qu'ont certains matériaux ferromagnétiques à se déformer sous l'influence d'un champ magnétique B. La magnétostriction inverse connu sous l'effet Villari est le changement de la perméabilité magnétique d'un matériau dû à sa déformation. Ce sont des effets du second ordre, c'est-à-dire que pour la magnétostriction, une inversion du champ magnétique ne change pas le sens de la déformation qui est induite dans le matériau. Le piezo-magnétisme est l'effet du premier ordre correspondant où une inversion du champ magnétique

entraine également une inversion du sens de déformation (IEEE Standards Board, 1991). Les pendants de ces phénomènes pour les champs électriques sont les phénomènes d'électrostriction et de piézoélectricité.

La perméabilité magnétique μ est la capacité d'un matériau à s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique externe. La perméabilité magnétique relative μ_r d'un matériau et sa perméabilité magnétique μ sont reliées par l'équation $\mu = \mu_0\mu_r$ avec μ_0 la perméabilité magnétique du vide. $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}H/m$. La perméabilité magnétique μ_r peut s'écrire aussi en fonction de la susceptibilité magnétique χ_m : $\mu - r = 1 + \chi_m$.

Les matériaux ferromagnétiques ont une perméabilité magnétique relative forte ($\mu_r \& \chi_m \gg 1$) et peuvent donc s'aimanter lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique externe H. Les courbes d'aimantation B-H traduisent ce phénomène. Les matériaux diamagnétiques sont en toutes circonstances amagnétiques ($\mu_r < 1 \& \chi_m < 0$). Les matériaux paramagnétiques s'aimantent très faiblement ($\mu_r > 1 \& \chi_m < 1$). Lorsqu'un matériau ferromagnétique dépasse une certaine température appelée Température de Curie, il perd ses propriétés magnétiques et devient paramagnétique.

De nombreux auteurs ont documenté le comportement magnéto-mécanique de différents matériaux. (Swartzendruber et al., 1997) ont étudié un acier ULC, (Stupakov et al., 2007) un acier bas carbone, et (Gorkunov et al., 2007) des aciers St3, C45 et C45 trempé. Ces auteurs ont décrit la variation des courbes d'aimantation pour un spécimen des matériaux caractérisés en traction. (Iordache, 2003) en a fait de même pour un grade d'acier Fe3Si mais a étudié en outre les états déchargés correspondants et le comportement en recharge après plastification et décharge de cet acier.

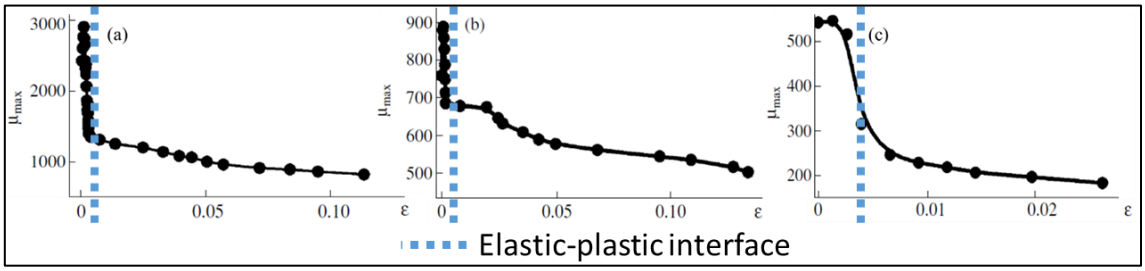


Figure 96 : Variation de μmax en fonction de la déformation pour un acier a) St3 ; b) C45 c) C45+QT (Gorkunov et al., 2007)

Les matériaux étudiés par ces auteurs voient de manière générale leurs propriétés magnétiques s'affaiblir lorsqu'ils sont soumis à une contrainte. La perméabilité maximale diminue, l'aimantation rémanente et à saturation diminue, le champ coercitif augmente. Pour résumer, le cycle B-H s'aplatit ce qui traduit le fait que le matériau perd sa capacité d'aimantation avec la déformation, donc avec la contrainte. De plus, les courbes produites traduisent deux zones correspondant aux domaines élastiques et plastiques des matériaux étudiés (Figure 96).

Cependant, certains matériaux peuvent voir leur propriété magnétique s'améliorer avec la contrainte. C'est par exemple le cas du permalloy mais pas le cas du Nickel pour une contrainte de 20 MPa (Figure 97).

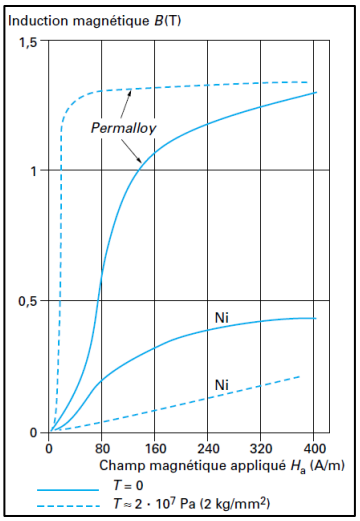


Figure 97 : Effet d'une contrainte T sur la courbe B-H du Nickel et du Permalloy (Hartemann, 1999)

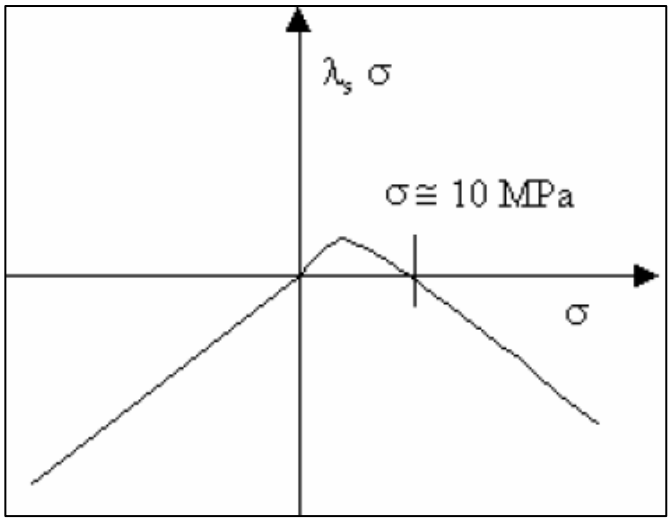


Figure 98 : Evolution de $\lambda_s\sigma$ d'un acier Fe-3Si en traction en fonction de la contrainte pour H = H_s (Iordache, 2003)

Afin d'avoir un comportement magnétique monotone en contrainte il faut étudier l'évolution du coefficient de magnétostriction λ en fonction de la contrainte pour un champ H fixé. La magnétostriction λ est la déformation du matériau causée uniquement par le champ H dans lequel il est plongé.

L'aimantation est facilitée lorsque $\lambda\sigma$ est positif et inversement. Il faut donc s'assurer que $\lambda\sigma$ soit de même signe pour tout sigma et pour le H souhaité afin d'avoir un comportement monotone et symétrique en traction et compression.

Par exemple, pour l'aimantation à saturation H_s, le produit $\lambda_s\sigma$ est positif pour une contrainte σ comprise entre 0 et 10 MPa (Figure 98). Le Fe3Si s'aimante donc plus facilement pour une faible contrainte de traction que pour une contrainte nulle. En dehors de cette plage de contrainte, l'alliage se désaimante et voit ses propriétés magnétiques s'affaiblir.

III.3.4.3. Evaluation du contrôle par induction de la perméabilité relative d'un témoin magnétostrictif enfoui

Cette technologie permet un contrôle aisé de la contrainte subie par la pièce. La compacité du témoin enfoui est faible et ne demande pas de gaine de protection. Cependant afin que le témoin soit complètement aimanté et visible par induction, il doit avoir une épaisseur faible, ce qui peut le rendre vulnérable vis-à-vis de la soudure. Afin que celui-ci ne soit pas détérioré et ne fonde pas à cause d'un apport électrique ou calorifique trop important de l'arc de soudure, un dispositif permettant d'améliorer sa conduction calorifique et électrique est nécessaire. De plus, le matériau du témoin doit être choisi avec précaution car il doit avoir une perméabilité relative bien plus forte que celle de la pièce.

L'information renvoyée par le capteur renseigne sur la perméabilité magnétique moyenne du témoin et donc renseigne sur la contrainte moyenne du témoin dans sa direction principale de déformation.

Un RLC-mètre doit être utilisé en combinaison de la sonde ce qui peut augmenter le coût total de cette solution mais il reste inférieur aux coûts imposés par des technologies d'imagerie.

Afin de rendre l'ensemble autonome, le RLC-mètre utilisé et le générateur de courant alternatif doivent être portable. Si le RLC mètre ne peut être portable alors la sonde doit être reliée à la place à une mémoire et à un module de transfert de données sans fil.

Le Tableau 16 présente l'évaluation de cette technologie suivant les critères présentés au paragraphe 2.2.

Tableau 16 : Evaluation suivant les critères sélectionnés des technologies de CND par induction de la perméabilité magnétostrictive d'un témoin

Critère	Note	Justification
1 Prétraitement	7	Amélioration de l'évacuation thermique et électrique nécessaire pour l'insertion à cause de la faible épaisseur du témoin
2 Compacité	9	Très compact car témoin fin
3 Précision	3	Précision pas vraiment déterminée (mais pas de perte car pas de protection)
4 Etendue	3	Dépend du matériau du témoin (allongement à la rupture) et de la largeur du pic de résonnance
5 Communication	3	Matériau amagnétique, accès à une surface d'interrogation usinée pour la bobine (surface plane préférable pour éviter effets de sinuosité) + Générateur AC + Témoin
6 Conditionnement	3	RLC mètre
7 Autonomie	3	Générateur AC portable (pile peut suffire car µA) + Signal sans fil (avant ou après le RLC mètre si RLC mètre portable)
8 Coût	7	Pas trop cher (sauf RLC mètre)
9 Robustesse	9	Correcte car complètement enfoui / surface contact émetteur/ possibilité de recalibrer/utiliser une autre technologie
10 Mesurandes Sup.	1	Pas de données supplémentaires

III.3.5. Conclusion

Un exemple de technologie de chaque famille a été présenté. L'évaluation des divers exemples de technologie suivant les critères proposés est résumée dans le Tableau 17 ci-dessous.

Tableau 17 : Récapitulatif des évaluations des technologies présentées

Technologie / Critère	Jauge	Fibre de Bragg	Ultrasons Multiéléments	CND par Induction
1 Prétraitement	1	3	7	7
2 Compacité	1	3	9	9
3 Précision	3	9	3	3
4 Etendue	9	1	3	3
5 Communication	7	3	7	3
6 Conditionnement	9	1	1	3
7 Autonomie	9	1	1	3
8 Coût	9	1	3	7
9 Robustesse	1	3	9	9
10 Mesurande Sup.	3	9	3	1

III.4. Mise à l'épreuve du guide de sélection

L'objectif de cette section est de montrer l'intérêt du guide de sélection proposé pour le choix d'une technologie de capteur afin de rendre intelligente une pièce fabriquée en WAAM. Pour cela le guide sera mis à l'épreuve sur deux typologies de pièce très différentes :

- Un longeron d'aile d'avion (Figure 99)
- Un crochet de levage pour cabine de peinture (Figure 100)

Leurs spécifications sont présentées et en fonction de celles-ci, des poids sur chacun des critères de sélection pour l'insertion d'une technologie de mesure appropriée sont attribués.

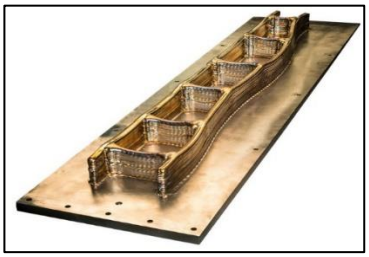


Figure 99 : Longeron d'aile d'avion réalisé en WAAM (Williams et al., 2016)

Figure 100 : Crochet de levage réalisé en WAAM (Jackson, 2018)

III.4.1. Pièce exemple 1 : Longeron d'aile d'avion

Un longeron d'aile d'avion est une poutre longitudinale supportant les nombreuses nervures et lisses dessinant le profil de l'aile. Un longeron est fixé au corps de l'avion et va jusqu'au bout de l'aile.

Instrumenter un longeron d'aile d'avion en rendant la pièce intelligente présente un intérêt important pour l'avionique. Cette pièce étant critique, il est crucial pour le contrôle de l'appareil de pouvoir suivre les sollicitations au cœur de celle-ci.

En fonction de la phase d'usage (décollage, vol, transit, atterrissage), la sollicitation peut varier grandement. Il est donc important de pouvoir mesurer la contrainte en plusieurs points. La précision des mesures doit être importante au regard de la forte criticité de la pièce. Cependant la mesure doit être réalisée uniquement dans le domaine élastique. En effet, la pièce ayant une forte criticité, elle n'est jamais sollicitée de manière à ce qu'elle puisse se plastifier, et est remplacée bien avant. Le contrôle de cette pièce peut être réalisé de manière continue, et une instrumentation complexe peut s'intégrer aisément au cockpit. Le surcout de l'instrumentation est absorbé dans le prix global de l'avion.

Le Tableau 18 présente ainsi les poids qui ont été attribués aux différents critères vis-à-vis des spécifications d'un longeron d'aile d'avion.

Tableau 18 : Attribution des poids sur les critères de sélection pour l'insertion d'une technologie de mesure dans un longeron

Critère	Poids	Justification
1 Prétraitement	3	Critère peu important (le temps du prétraitement peut être important)
2 Compacité	3	Critère Peu important (la solution peut ne pas être compacte en longueur)
3 Précision	9	Critère très important (précision haute car aéronautique)
4 Etendue	1	Critère peu important (la contrainte reste élastique)
5 Communication	3	Critère peu important (connectique)
6 Conditionnement	3	Critère peu important (cockpit peut prendre en charge un traitement complexe)
7 Autonomie	3	Critère peu important (relié au cockpit, aucun mouvement relatif)
8 Coût	3	Pas un critère important (absorbé par le cout total de l'avion)
9 Robustesse	7	Pour des raisons de sécurité, la robustesse est un critère très important
10 Mesurandes Sup.	9	Important d'avoir le plus d'informations possibles (aéronautique)

III.4.2. Pièce exemple 2 : Crochet de levage pour pièce légère

La seconde pièce considérée est un crochet de levage servant à porter des pièces légères dans des cabines de peinture à projection de poudre. Ainsi, le crochet devra être amagnétique afin de ne pas perturber le process de peinture. Le crochet est soumis à une sollicitation régulière et toujours en flexion. Réaliser un crochet de levage intelligent permet de suivre la contrainte subie par le crochet tout en protégeant le capteur inséré dans la pièce du milieu hostile dans lequel évolue le crochet.

Des exemples de crochet de levage en acier ont déjà été réalisés en WAAM (Figure 100), notamment par (Jackson, 2018).

La mesure de contrainte peut être réalisée de manière continue ou inopinée pour s'assurer de l'état de santé du crochet. La charge des pièces portées peut varier et l'enjeu est de vérifier si une pièce trop lourde n'a pas été supportée par le crochet. Le coût de l'instrumentation doit rester faible au regard du prix d'un crochet de levage classique. Enfin, l'insertion et l'instrumentation du capteur ne doit pas gêner ou affaiblir la pièce au cours de sa phase d'usage.

Le Tableau 19 présente ainsi les poids qui ont été attribués aux différents critères vis à vis des spécifications d'un crochet de levage.

Tableau 19 : Attribution des poids sur les critères de sélection pour l'insertion d'une technologie de mesure dans un crochet de levage pour pièce légère

Critère	Poids	Justification
1 Prétraitement	7	La pièce doit être réalisable rapidement (peu d'étape de prétraitement)
2 Compacité	9	Il faut que la compacité soit faible car le crochet de levage peut être petit
3 Précision	7	Précision suffisante (une faible résolution n'est pas l'objectif)
4 Etendue	7	Etendue de mesure importante (il faut mesurer après la plasticité)
5 Communication	7	Communication sans connectique sortante (pour ne pas fragiliser)
6 Conditionnement	7	Conditionnement simple pour être utilisable par ouvrier peu qualifié
7 Autonomie	7	C'est mieux si ça marche de manière autonome pour mesure continue
8 Coût	9	La solution doit être peu couteuse
9 Robustesse	9	Pour des raisons de sécurité, la robustesse est un critère très important
10 Mesurandes Sup.	1	La sollicitation est connue et simple

III.4.3. Calcul du résultat pour chaque pièce et sélection de la technologie la plus adaptée

Le Tableau 20 récapitule les poids attribués pour chaque critère au regard des spécifications des pièces à rendre intelligente.

Tableau 20 : Récapitulatif des poids attribués sur chaque critère pour les deux pièces exemples

Critère / Pièce	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longeron d'aile d'avion	3	3	9	1	3	3	3	3	7	9
Crochet de levage	7	9	7	7	7	7	7	9	9	1

Le score de chaque technologie se calcule en faisant le produit matriciel du Tableau 20 par le Tableau 17. Cela revient à réaliser une somme pondérée pour chaque couple- technologie-pièce. Ces scores sont présentés Tableau 21.

Tableau 21 : Scores établis par chaque technologie pour les deux pièces considérées

Technologie / Pièce	Jauge	FBG	Ultrasons multiéléments	Induction
Longeron d'aile d'avion	178	**220**	198	198
Crochet de levage	368	198	328	**380**

Le calcul des scores pour les pièces WAAM exemples proposées indique que le contrôle de la contrainte par induction est une technologie plus appropriée que le contrôle par fibre de Bragg pour rendre un crochet de levage intelligent. C'est le cas contraire pour un longeron d'aile d'avion.

Le guide proposé permet donc bien de sélectionner une technologie adaptée à l'enfouissement dans une pièce réalisée par WAAM et qui reste adaptée au cas d'usage de cette pièce.

III.5. Technologie retenue pour la suite de l'étude

Il est décidé de se concentrer pour la suite du manuscrit sur une seule technologie. Le choix se porte sur la mesure par induction de la perméabilité d'un témoin magnétostrictif enfoui. Cette technologie est peu abordée dans la littérature et semble à fort potentiel et couvrir de nombreux cas d'usage. Il est décidé d'augmenter le TRL de cette technologie en développant une sonde. Le laboratoire TIMA a réalisé cette sonde. Cette section présente son fonctionnement.

La variation de perméabilité magnétique d'un témoin enfoui peut être contrôlée par induction. En effet, l'inductance d'une bobine L dépend de la perméabilité magnétique des matériaux traversés par les lignes de champ qu'elle génère.

Afin de pouvoir distinguer le témoin dans la pièce par induction, il est nécessaire que la pièce ait une perméabilité magnétique très différente de celle du témoin et que le champ magnétique soit suffisamment fort pour aimanter jusqu'au témoin. En effet, une perméabilité forte de la pièce hôte entraine une profondeur d'interrogation plus faible (effet de peau).

Dans le cadre du projet FAIR, le laboratoire TIMA a développé une sonde permettant de mesurer une cible ferromagnétique ($\chi_m \gg 1$) au travers d'une pièce amagnétique, c'est-à-dire diamagnétique ($\chi_m < 0$) ou paramagnétique ($0 < \chi_m < 1$). L'enjeu est de repérer la contrainte subie par le témoin par sa perte de magnétisation lorsqu'il est plongé dans un champ magnétique (affaiblissement de B et de µ). Le capteur permet donc de créer un champ magnétique venant aimanter le témoin et mesurer sa perte d'aimantation due à la contrainte qu'il subit.

La perte de magnétisation du témoin se traduit dans le champ magnétique total vu par la bobine et donc dans la variation de son impédance. Le dimensionnement de la bobine et de la fréquence d'utilisation est fait pour obtenir la plus grande précision et résolution spatiale possible. Le capteur est ainsi capable de détecter des cibles circulaires (témoin) en acier galvanisé de 8 mm de diamètre et de 100 à 1000 µm d'épaisseur sous 1,6 mm d'aluminium (Figure 101). La variation de la hauteur du pic obtenu sur le C-scan (Figure 102) renseigne sur la contrainte subie par le témoin.

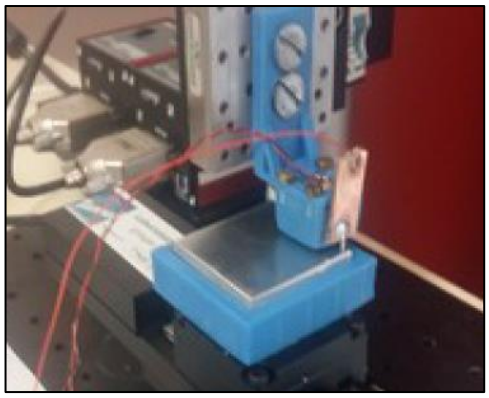


Figure 101 : Montage de la sonde développée permettant de réaliser un C-Scan d'une cible en acier caché sous une plaque d'aluminium

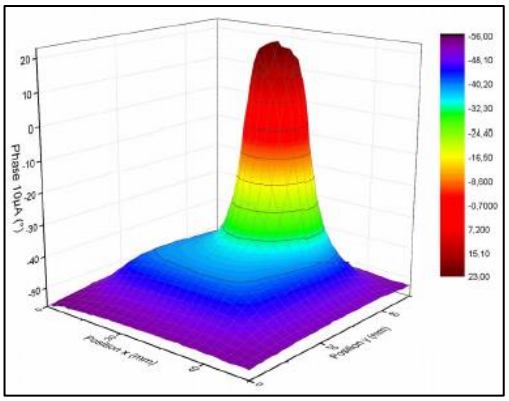


Figure 102 : C-scan de la variation de phase de l'impédance du capteur développé pour une cible circulaire en acier caché sous une plaque d'aluminium

<u>Utilisation du capteur :</u>

Afin de mesurer la contrainte avec le capteur, il est nécessaire de réaliser plusieurs opérations (Figure 103 à Figure 106)

D'abord, il faut mesurer le signal que le capteur renvoie lorsqu'il ne se situe pas en face du témoin et que la pièce n'est pas contrainte. Cela permet de connaître le signal dû à la pièce seule Z1 (Figure 103).

Ensuite, il faut mesurer le signal Z3 qu'il renvoie lorsqu'il se situe en face du témoin et que la pièce n'est pas contrainte (Figure 105). En soustrayant Z3 à Z1, la contribution sur le signal du témoin non déformé est connue.

Lorsque la pièce est déformée, il est nécessaire de mesurer le signal lorsque le capteur n'est pas en face du témoin Z2 pour connaître la variation du signal dans la pièce lorsqu'elle est contrainte (Figure 104). Si la pièce n'est pas magnétostrictive Z2-Z1 doit être proche de 0.

Enfin, placer le capteur en face du témoin afin de mesurer le signal de la pièce et du témoin lorsqu'ils sont contraints, (Figure 106). En soustrayant Z2 à Z4, il est possible d'isoler la contribution du témoin lorsqu'il est déformé.

Maintenant la variation du signal provoquée par le témoin lorsqu'il est contraint par rapport à son état non contraint est connue (Z1-Z3 – (Z4-Z2)). Une demande de dépôt de brevet a été réalisée conjointement avec le laboratoire TIMA concernant ce capteur (Ricart et al., 2021).

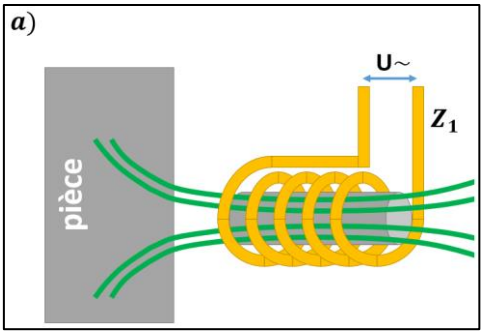


Figure 103 : Impédance Z1 mesurée sur la pièce non déformée sans le témoin

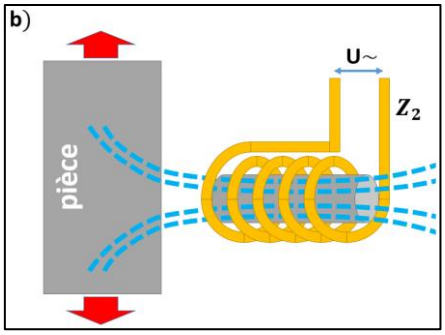


Figure 104 : Impédance Z2 mesurée sur la pièce déformée sans le témoin

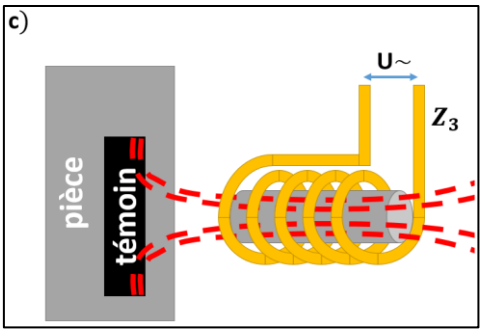


Figure 105 : Impédance Z3 mesurée sur la pièce non déformée avec le témoin

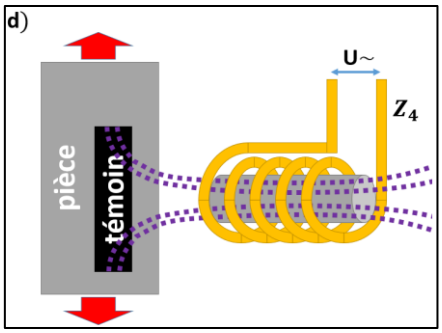


Figure 106 : Impédance Z4 mesurée sur la pièce déformée avec le témoin

La sonde n'est plus mentionnée dans la suite de l'étude et l'attention se portera essentiellement sur l'insertion et le placement du témoin.

III.6. Conclusion et perspectives

Il a été proposé dans ce chapitre un guide de sélection de technologies de mesure de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM.

Ce guide se base sur des critères proposés permettant d'évaluer la pertinence et la capacité d'une technologie à être insérée au cours du processus de fabrication d'une pièce en WAAM. Une classification des technologies de mesure de contrainte a été proposée. Le guide a été utilisé pour l'évaluation de quatre technologies de mesure devant être insérées pour la réalisation de deux pièces intelligentes en WAAM ayant des spécifications différentes.

La liste de critères sur laquelle s'appuie la méthode n'est pas exhaustive est peut-être retravaillée par un panel d'expert. La méthode de sélection par somme pondérée bien que simple nécessite une bonne connaissance des technologies de mesure et des pièces à réaliser pour pouvoir juger la pertinence de chacun de ses critères vis à vis des spécifications d'une pièce.

Le guide de sélection permet de réaliser un classement des technologies. Cependant, il est important de vérifier la capabilité de la technologie choisie vis-à-vis de chacun des critères. Afin de prendre en compte cela, il serait possible de traduire les scores en désirabilité (Derringer and Suich, 1980) et d'utiliser le produit pondéré pour agréger ces résultats. Ainsi, associer une désirabilité nulle aux technologies non capables permet de ne pas les retenir. Pour les technologies capables, le choix de la fonction de désirabilité permet la prise en compte binaire ou non du critère.

Quatre exemples de chacune des familles de technologies de mesure ont été présentés, mais les scores peuvent varier à l'intérieur d'une même famille. Une jauge piézo-électrique n'aura pas la même capacité de mesure ponctuelle qu'une jauge à trame pelliculaire. De même, une radiographie d'une pièce donne un score très différent d'une imagerie par inspection ultrasonore multiéléments.

Il est à rappeler que le guide est présenté sur certaines technologies dont le TRL est faible et/ou dont les connaissances sont peu nombreuses. Avec le développement de ces technologies et la participation d'experts, les critères proposés, l'évaluation des technologies et des spécificités des pièces sont à ajuster.

Le capteur développé par le laboratoire TIMA semble particulièrement adapté à la création de pièce intelligente en WAAM. En effet, il semble :

- Peu sensible à l'état de surface extérieur.

- L'enfouissement d'un témoin passif semble facilement réalisable.
- De nombreux scénarios de mesure peuvent être envisagés (ceux-ci seront présentés dans le Chapitre V).
- Le coût du corps d'épreuve est très faible, ce qui pourrait permettre de multiplier les points de contrôle sur une même pièce.
- Le transducteur étant amovible et de faible coût, son utilisation pourrait être répandue.

Ainsi, la suite de ce manuscrit se concentre sur l'étude de cette technologie d'un point de vue de la fabrication et de la conception de pièces intelligentes intégrants cette technologie.

La capabilité de fabrication par procédé WAAM d'une pièce intelligente utilisant cette technologie est démontrée dans le chapitre suivant et une stratégie de fabrication est proposée. Une méthode de conception et de placement du témoin dans la pièce hôte est présentée au Chapitre V

.

Chapitre IV : Fabricabilité d'une pièce en aluminium contenant un témoin en acier

Le contrôle par induction de la perméabilité magnétique d'un témoin magnétostrictif enfoui dans une pièce amagnétique est la solution retenue dans le chapitre précédent et qui a été développée en partenariat avec le laboratoire TIMA. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les capacités offertes par le procédé WAAM pour enfouir le témoin sélectionné.

Dans ce chapitre, le périmètre de recherche est donné avec les contraintes d'inclusion spécifiées par le laboratoire TIMA. Une expérience préliminaire permettant d'évaluer la capacité du témoin choisi à former un contact mouillé avec la soudure est présentée. Enfin, une expérience permet de définir la configuration expérimentale permettant d'enfouir le témoin dans des cordons de soudure. Des échantillons sont prélevés et analysés en tomographie et au microscope électronique à balayage pour évaluer la qualité de la liaison entre le témoin et la soudure aluminium.

IV.1. Périmètre de recherche

Le capteur sélectionné est composé d'une sonde de mesure développée par le laboratoire TIMA et d'un témoin servant de corps d'épreuve enfoui dans la pièce hôte. Des spécifications précises ont été émises concernant la géométrie, l'épaisseur et la profondeur d'enfouissement du témoin pour le bon fonctionnement du capteur. Ces spécifications sont les suivantes.

Le témoin doit être dans un matériau magnétique, par exemple un acier ou un alliage de nickel, et la pièce hôte doit être dans un matériau amagnétique, par exemple l'aluminium et ses alliages ou certains aciers inoxydables. Les essais ont été réalisés par le laboratoire TIMA avec un témoin extrait d'un feuillard en acier enfoui dans une pièce en alliage d'aluminium. Le témoin doit être enfoui à moins de 2 mm de la surface afin qu'il puisse être complètement atteint par les lignes de champs émises par la sonde. Il doit être également d'une épaisseur inférieure à 1 mm et de préférence le plus fin possible afin que les lignes de champs émises par la sonde puissent le traverser complètement.

Deux difficultés apparaissent pour enfouir le témoin dans une pièce massive en alliage d'aluminium :

- La soudure aluminium – acier :

L'aluminium et l'acier sont deux matériaux difficiles à souder ensemble (Mezrag et al., 2015). La section I.3.2 permet de choisir un témoin en acier galvanisé et un alliage d'aluminium AlSi5. Cette section souligne l'importance d'adapter l'énergie développée lors de la soudure. La technologie CMT et l'usage d'un plateau chauffant permettent d'obtenir un cordon mouillé en minimisant cette énergie.

- La soudure d'un témoin fin dans une pièce massive :

Le niveau d'énergie apportée pour souder ensemble deux éléments d'épaisseurs très différentes est un enjeu important. La section I.3.3 permet de choisir une technologie idéale pour ce type de soudure, la soudure CMT Pulse Advanced. Il est important de minimiser l'énergie apportée au témoin fin, pour cela l'usage d'une masselotte permettant d'améliorer l'évacuation électrique et thermique est conseillé, tout comme l'usage d'un plateau chauffant qui permet d'améliorer le mouillage avec la pièce massive tout en gardant une énergie de soudure relativement faible.

Le témoin est réalisé à partir d'un feuillard d'acier galvanisé obtenu par formage à froid. Il provient d'un rouleau de feuillard DX51D Z100 à Z200 (norme EN 10346) ayant donc une épaisseur de zinc comprise entre 7 et 14 µm. Le rouleau provient de chez Evicom (ref FFE0625) et a les dimensions suivantes : 40 mm*25000 mm*0,6 mm. La composition de l'acier est présentée Tableau 22.

Tableau 22: Composition chimique de l'acier DX51D (% en masse max.)

Nuance	C	Si	Mn	P	S	Ti
DX51D	0,18	0,50	1,20	0,12	0,045	0,30

Un témoin de dimensions 40 mm*15 mm*0,6 mm est extrait à l'aide d'une cisaille du rouleau. Le témoin est écorné par la découpe ce qui complexifie son insertion. Il est donc aplati par la suite à la presse hydraulique. L'épaisseur mesurée après aplatissement est en moyenne de 0,55 mm.

La pièce hôte est réalisée en alliage d'aluminium avec la cellule WAAM CMT décrite précédemment ainsi qu'avec les paramètres de soudures proposés au Chapitre II. Cependant ces paramètres doivent être localement adaptés pour permettre une insertion saine du témoin.

En effet, pour ne pas détériorer le témoin, il est nécessaire de minimiser l'énergie apportée à celui-ci. Celle-ci est proportionnelle à l'énergie linéique de la soudure. Ainsi, les paramètres de fabrication dans le voisinage du témoin sont choisis en adaptant la méthode proposée au Chapitre II afin de minimiser cette fois-ci l'énergie linéique tout en gardant un mouillage suffisant.

Les paramètres de soudage sélectionnés pour l'enfouissement du témoin sont présentés Tableau 23 :

Tableau 23 : Paramètres de soudage pour insertion

Loi	WFS (m/min)	TS (m/min)	WFS/TS	T° Substrat (°C)	EP/EN (+/-)	Gaz (L/min)
CMTPA 1369	8,3	0,9	9,2	150	3 (19/10)	14

Ils correspondent à un cordon dont les propriétés géométriques et énergétiques sont décrites Tableau 24, ce qui correspond à la plage énergétique de 110-130 J/mm recommandée par (Kumar et al., 2022) pour la soudure aluminium acier avec le mode CMTPA :

Tableau 24 : Caractéristiques cordon pour insertion

Largeur W (mm)	Hauteur H (mm)	Rapport (W/H)	Angle de mouillage (°)	Energie Linéique (J/mm)	Energie Massique (J/g)
6,51	2,56	2,54	103	120	4247

Les paramètres de soudage qui sont modifiés entre la réalisation de la pièce et l'insertion du témoin sont présentés Tableau 25 :

Tableau 25 : Modification des paramètres de fabrication pour l'insertion

Cas	TS (cm/min)	EP/EN	T° Substrat (°C)
Insertion	90	3 (19+/10-)	150
Pièce	41,5	5 (25+/10-)	150 puis 300

L'enjeu maintenant est donc de trouver une configuration qui permette de réaliser une liaison saine entre la pièce hôte et le témoin avec les paramètres de soudure sélectionnés. L'objectif final est que le témoin ne soit pas détérioré et que le contact entre le témoin en acier et les cordons de soudure en alliage d'aluminium soit assuré. Ce contact est caractérisé par l'épaisseur et la nature de la couche intermétallique créée à l'interface avec le témoin.

Deux expériences sont présentées dans ce chapitre : une expérience de validation du revêtement du témoin pour sa soudabilité et une expérience de validation de la stratégie d'enfouissement. La section suivante détaille les expériences réalisées ainsi que l'analyse des

échantillons obtenus qui ont permis de déterminer une configuration témoin-torche permettant d'obtenir une liaison témoin-pièce adéquate.

IV.2. Validation du revêtement du témoin

IV.2.1. Objectif

Comme cela a été mentionné section I.3.2 du chapitre bibliographique, la soudure entre l'acier et l'aluminium est très complexe tout comme la soudure d'un témoin fin avec une pièce massive. Ici, le rapport de taille entre le substrat en alliage d'aluminium et le témoin est de presque 10. Ainsi, sans adapter les paramètres de soudure, le témoin est très affecté thermiquement voire détérioré et la soudure n'est pas de bonne qualité (Figure 107). En adaptant les paramètres de soudure sans appliquer de revêtement zinc sur le témoin, la liaison obtenue n'est pas de bonne qualité. Le mouillage n'est pas assuré entre le cordon et le témoin en acier (Figure 108).

Figure 107: Détérioration d'un témoin fin en acier causée par une soudure aluminium non adaptée

Figure 108: Non mouillage de cordons de soudure en alliage d'aluminium sur un témoin en acier

L'enjeu est de valider dans une configuration simple le revêtement en zinc du témoin et de vérifier si le cordon en alliage d'aluminium mouille sur le témoin sans l'abimer. Tester la configuration du témoin à plat permet d'évaluer si l'épaisseur de zinc est suffisante pour permettre un contact mouillé à la fois sur le témoin et sur la pièce. Deux angles de torche et deux offsets sont testés pour vérifier s'ils ont une influence sur le mouillage du cordon sur le témoin.

IV.2.2. Configuration

Le feuillard est d'abord mis à plat sur le substrat est recouvert d'une masselotte en alliage d'aluminium facilitant l'évacuation électrique et thermique (Figure 109). Différents offsets et angles de torche sont testés : (offset : 1 mm, 2 mm ; angle : 45°, 90°)

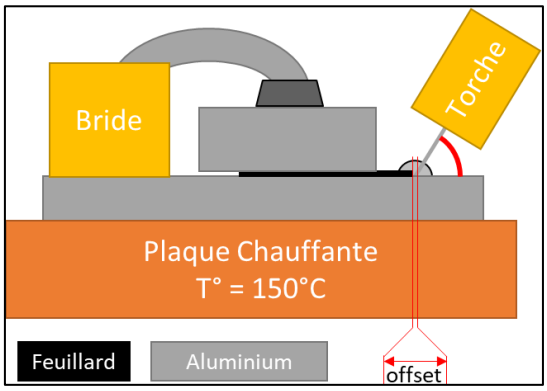


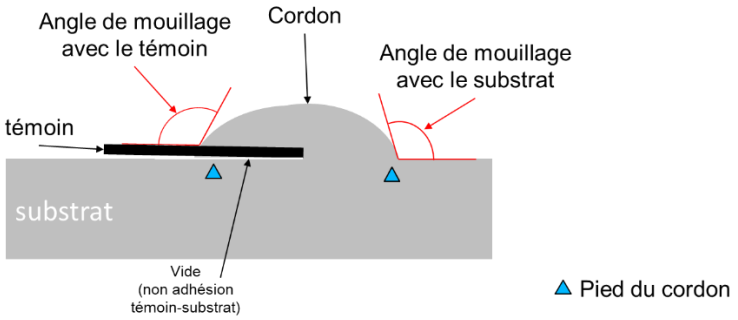
Figure 109 : Témoin à plat sur le substrat

IV.2.3. Observations et résultats

Les échantillons obtenus avec cette première configuration ont tous un défaut commun : le cordon de soudure n'est en contact avec le témoin que sur la surface supérieure. La face en contact avec le substrat n'est pas liée avec le cordon de soudure. Cela peut se voir sur les vues en coupe du Tableau 26.

Ce résultat était à prévoir et n'est pas surprenant. Cependant le contact entre la soudure et le témoin d'une part et le substrat d'autre part montre un bon mouillage. Le revêtement sélectionné semble donc satisfaisant.

Tableau 26 : Résultats de l'expérience préliminaire

Offset / Angle	1 mm	2 mm
Schématisation de la vue en coupe des cordons		
90°		
45°		

L'inclinaison de l'outil et l'offset ne semblent pas avoir d'influence significative sur la géométrie du cordon.

IV.2.4. Conclusion

La soudure semble avoir un bon mouillage avec le témoin d'une part et avec le substrat d'autre part. Le revêtement en zinc du témoin semble donc satisfaisant pour permettre la liaison entre le témoin en acier et la soudure aluminium.

Il pourrait être intéressant d'investiguer d'autres types de revêtement comme le galfan (zinc-aluminium) ou des revêtements aluminium-zinc ou en aluminium-silicium. De plus, l'encapsulation du témoin dans une couche épaisse en aluminium réalisée avec une autre technologie pourrait faciliter grandement son insertion.

Pour la suite de l'étude, le revêtement en zinc est utilisé. La section suivante propose et évalue une stratégie d'enfouissement bilatérale du témoin.

IV.3. Validation de la stratégie d'enfouissement

IV.3.1. Stratégie d'enfouissement

Il a été validé que la galvanisation d'un témoin d'acier permet un bon mouillage de la soudure aluminium sur celui-ci. Ce bon mouillage est maintenu lorsque le témoin est positionné sur la tranche Figure 110. Cependant la forme du cordon est modifiée. En effet, au droit du témoin le cordon double voire triple de hauteur par rapport à sa configuration à plat et sa largeur diminue (Figure 110). Cela doit donc être pris en compte dans la stratégie de recouvrement du témoin. Des suies et projections peuvent être également observées sur le substrat (Figure 111). En outre un dépôt sombre est présent au pied du cordon entre le cordon et le témoin. D'après la littérature, il peut s'agir d'un amas de zinc.

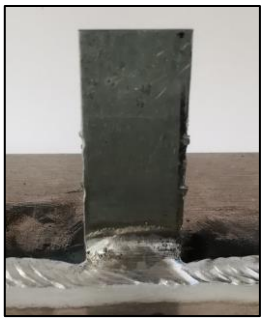


Figure 110: Vue de face d'un cordon soudé à un témoin en acier galvanisé

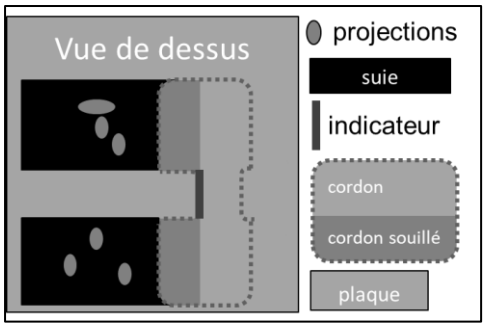


Figure 111: Schéma en vue de dessus du cordon obtenu en contact avec le témoin

La stratégie de recouvrement proposée est présentée Figure 112 et Figure 113. Une masselotte temporaire et placé d'un côté du témoin pour le positionner et le maintenir sur la tranche ainsi que pour favoriser l'évacuation électrique et thermique lors de la soudure. Un côté est complètement recouvert. Puis la masselotte est enlevée. Les cordons recouvrant le premier côté du témoin le maintiennent et prennent le rôle de la masselotte temporaire. Le côté opposé est ensuite recouvert. Le substrat et les cordons sont brossés à la paille de fer et nettoyés à l'isopropanol entre chaque soudure.

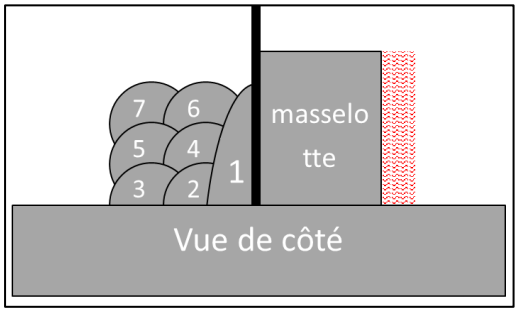


Figure 112: Première étape de l'enfouissement du témoin

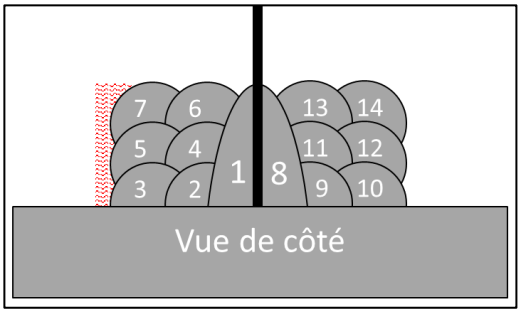


Figure 113: Seconde étape de l'enfouissement du témoin

Un témoin a ainsi pu être recouvert sur plusieurs couches de hauteur grâce à cette stratégie (Figure 114). Pour réaliser cette stratégie d'insertion, il est nécessaire de sélectionner un témoin plus grand que les dimensions souhaitées afin de le maintenir. Ainsi, lorsque la hauteur souhaitée a été recouverte, la partie non enfouie doit être enlevée. Une potentielle solution est de surfacer l'ensemble aux dimensions requises pour le témoin. Cela peut être réalisé par usinage ou par un autre procédé soustractif (découpe par électroérosion par exemple). Cette solution permet de poursuivre le processus WAAM sur une surface plane sans plus avoir à considérer la présence du témoin.

Figure 114: Témoin partiellement enfoui

IV.3.2. Conclusion intermédiaire

Une stratégie d'enfouissement a donc été proposée et testée. Le témoin enfoui peut cependant avoir été endommagé par l'arc de soudure. L'offset semble être un paramètre influant sur l'intégrité du témoin et la qualité de la liaison.

Dans les sections suivantes, une expérimentation est donc menée afin de déterminer la valeur de l'offset qui permet de réaliser une soudure ayant une bonne liaison avec le témoin sans l'endommager. L'épaisseur du témoin est analysée par tomographie pour déterminer sa détérioration. La couche intermétallique obtenue entre le témoin et le cordon de soudure est évaluée pour qualifier la qualité de la liaison obtenue.

Une optimisation de la forme du cordon de soudure pourrait être faite pour améliorer la géométrie du cordon au contact du témoin et simplifier la stratégie d'enfouissement. L'angle de torche est un paramètre influant sur la géométrie du cordon qui pourrait être optimisé en ce sens dans de futures études.

IV.3.3. Expérimentation sur l'influence de l'offset

Le témoin est cette fois-ci placé à la verticale (Figure 115 et Figure 116). Des cordons de soudure sont donc réalisés pour un seul angle de torche (45°) et différentes valeurs de distance fil-témoin appelée « offset » (toutes les valeurs de 0,5 mm à 5 mm par pas de 0,5 mm). L'encombrement sur une configuration où le témoin est à la verticale restreint les angles de torche possibles donc seul un angle de torche est testé.

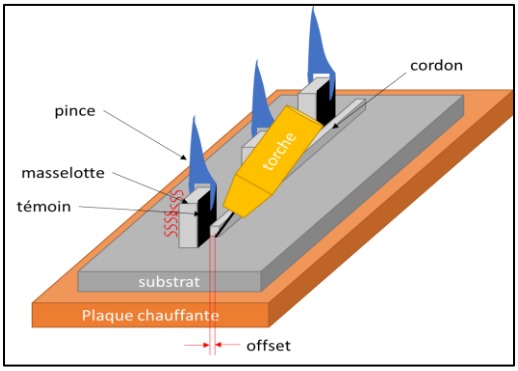


Figure 115 : Configuration témoin à la verticale

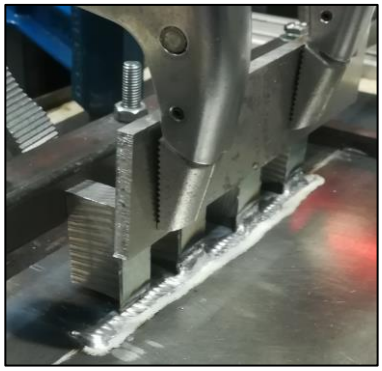


Figure 116 : Photo de la configuration

Les échantillons qui ont été réalisés avec un offset inférieur à 1,5 mm présentent un témoin dont la détérioration est visible à l'œil nu (Figure 117). Les échantillons réalisés avec un offset supérieur à 3 mm présentent un cordon de soudure qui n'est pas en contact avec le témoin sur toute sa largeur, (Figure 118). Les échantillons dont l'offset est compris entre 1,5 mm et 3 mm ne peuvent être distingués à l'œil nu. Il est nécessaire d'évaluer leur santé par de plus amples analyses.

Figure 117 : Détérioration au dos des témoins pour un offset trop faible

Figure 118 : témoin non lié avec un cordon pour un offset trop grand

Ces échantillons sont analysés au tomographe à rayons X du CMTC avec l'aide du laboratoire SIMAP.

IV.3.4. Analyse de la détérioration et du mouillage du témoin par tomographie

IV.3.4.1. Objectif

Aucun défaut n'a pu être distingué à l'œil nu sur les quatre échantillons sélectionnés. Cependant il est nécessaire de vérifier :

- L'intégrité du témoin après soudure, le témoin ne doit pas avoir subi de perte d'épaisseur
- Le bon contact entre les deux matériaux, le témoin doit être entièrement en contact avec le cordon de soudure.

Ces échantillons sont donc analysés par tomographie rayons X.

IV.3.4.2. Préparation des échantillons

Les échantillons sont extraits du substrat de la manière suivante :

Le substrat de 5 mm d'épaisseur est aminci par usinage de manière à ne laisser qu'un millimètre. Les échantillons sont ensuite extraits du substrat par électroérosion de manière à obtenir des pavés prenant toute la largeur du témoin (Figure 119). La partie non soudée des témoins est raccourcie à l'aide d'une cisaille. Au final, les quatre échantillons (Figure 120) sont délimités dans un pavé de dimensions 18 mm*4 mm*8 mm.

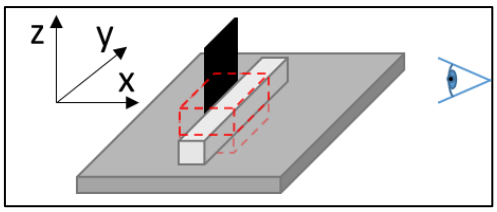


Figure 119:Extractions des échantillons sur les soudures réalisées

Figure 120 : Echantillons prédécoupés

Les 4 échantillons sont collés sur une tige et inspectés par le tomographe du CMTC qui réalise une cartographie 3D au rayons X de chaque échantillon (Figure 121). La taille de voxel obtenue pour chaque échantillon est présentée Tableau 27. Un ingénieur du laboratoire SIMAP réalise et calibre la tomographie et nous confie les données obtenues pour chaque échantillon.

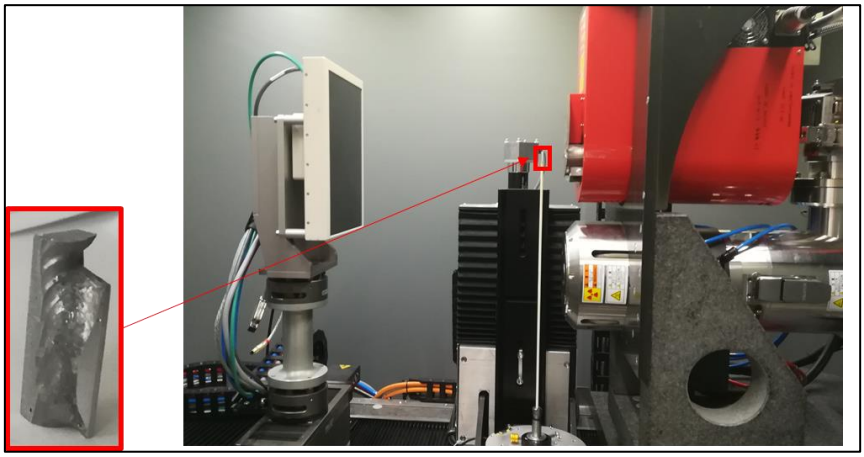


Figure 121 : Echantillon dans le tomographe

Tableau 27 : Taille de voxel pour chaque échantillon

Offset :	**1,5 mm**	**2 mm**	**2,5 mm**	**3 mm**
Taille de voxel :	10,53 µm	11,00 µm	11,54 µm	10,51 µm

IV.3.4.3. Réalisation des cartes d'épaisseur

Afin de vérifier l'intégrité du témoin, des cartes d'épaisseur des témoins sont établies. Pour cela, les images issues de tomographie sont traitées à l'aide du logiciel Fiji et le processus de traitement est décrit Figure 122.

Ces images sont recadrées, puis encodées sur 8 bits. Chaque pixel représentant l'absorbance prend donc une valeur comprise entre 0 et 255. Les images sont moyennées sur 2 pixels de rayon pour diminuer le bruit. Elles sont ensuite recadrées. Puis, chaque image est seuillée afin d'isoler le témoin acier. Les voxels ayant une absorbance au-dessus de ce seuil sont considérés comme appartenant à l'acier et il leur est attribué une absorbance de 255 ; ceux en dessous ne sont pas considérés comme de l'acier et une absorbance de 0 leur est attribué. Le choix du seuil est fait pour chaque échantillon de manière à délimiter le contour du témoin tout en limitant les artefacts produits par le témoin métallique. Le contour des zones à forte absorbance des rayons X comme l'acier est en général mal délimité, l'alliage d'aluminium proche de la zone est ainsi rehaussé et caché par l'acier. Ce type d'artefacts est bien connu en tomographie (Thiery, 2015).

Les images sont ensuite normalisées (divisé par 255). Chaque pixel des images vaut alors soit 0 (absence d'acier) soit 1 (présence d'acier). Les images sont ensuite compilées (additionnées). L'image résultante représente l'épaisseur du témoin en voxels, chaque pixel de l'image est associé à une valeur qui représente l'épaisseur du témoin en nombre de voxels. L'épaisseur en millimètre est ensuite obtenue en multipliant chaque valeur de pixel par la dimension d'un voxel en millimètre (Tableau 27).

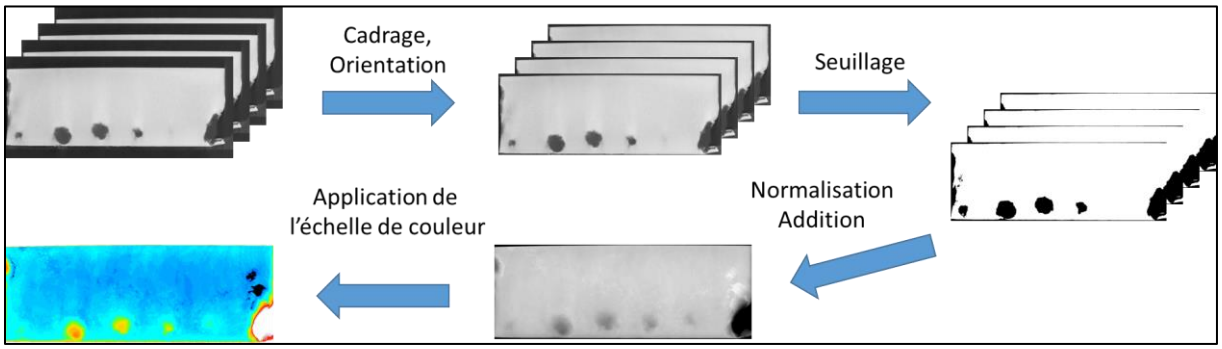


Figure 122 : Processus de réalisation des cartes d'épaisseur

La même échelle de couleur est utilisée pour toutes les cartes afin de pouvoir les comparer. Les pixels représentant une épaisseur supérieure à 0,6 mm sont considérés comme des artéfacts, noircis et non pris en compte. Il peut s'agir d'acier dilué dans l'alliage d'aluminium à la suite de la soudure.

IV.3.4.4. Observations des résultats et analyse

Les images résultantes sont présentées Figure 124 à Figure 127.

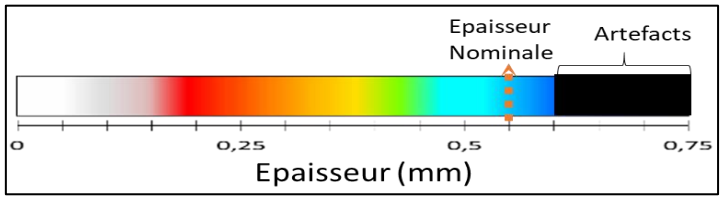


Figure 123 : Echelle des cartes d'épaisseur

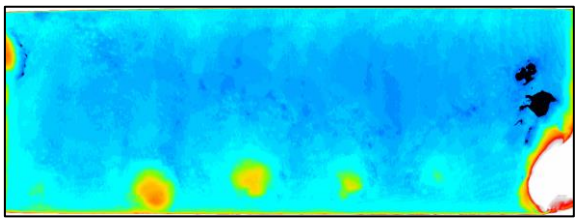


Figure 124 : Carte d'épaisseur du témoin (offset = 1,5 mm)

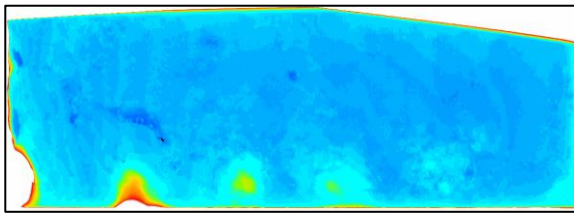


Figure 125 : Carte d'épaisseur du témoin (offset = 2 mm)

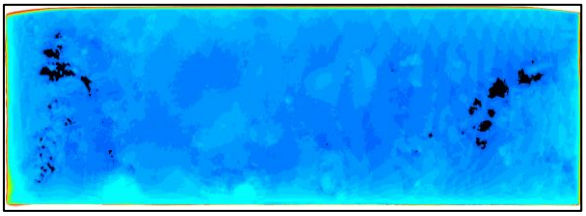


Figure 126 : Carte d'épaisseur du témoin (offset = 2,5 mm)

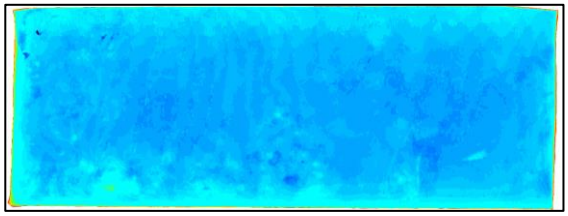


Figure 127 :Carte d'épaisseur du témoin (offset = 3 mm)

Les échantillons réalisés avec un offset de 1,5 mm et 2 mm présentent de fortes détériorations venant percer ou amincir le témoin de manière significative. Ces impacts sont espacés régulièrement, ils sont certainement liés aux phases chaudes cycliques du mode de soudage CMT Pulse Advanced. Les échantillons réalisés avec un offset de 2,5 mm et 3 mm ne présentent pas d'impact réduisant de manière significative l'épaisseur du témoin.

L'échantillon réalisé avec un offset de 3 mm présente des zones de non contact entre le témoin et le cordon de soudure visibles sur les images obtenues par tomographie (Figure 128). La soudure n'est donc pas satisfaisante. En revanche, l'échantillon avec un offset de 2,5 mm n'est pas détérioré et semble présenter un contact complet. Afin de valider ce bon contact, la couche intermétallique est étudiée dans la section suivante.

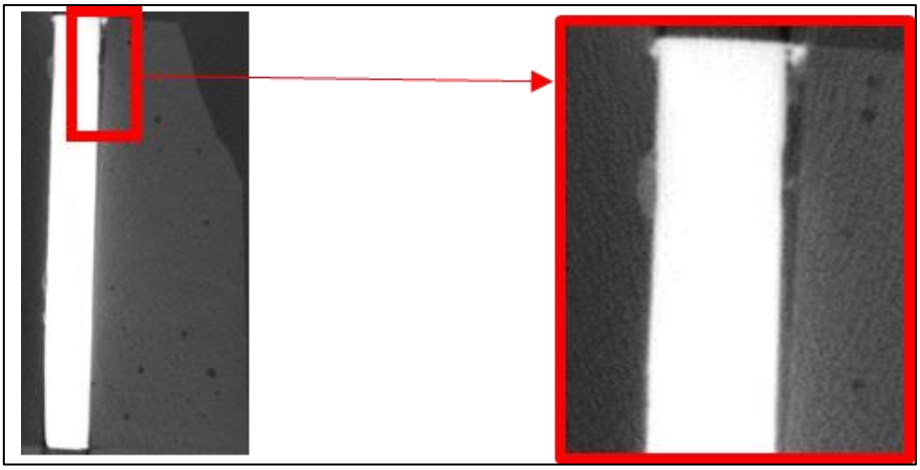


Figure 128 : Vue xz de la tranche de l'échantillon avec un offset de 3,0 mm (détachement (en noir) entre l'acier du témoin (en blanc) et l'alliage d'aluminium du cordon (en gris))

IV.3.5. Analyse de l'interface aluminium-acier

IV.3.5.1. Objectif

Il a été montré par l'étude bibliographique que la couche intermétallique est un paramètre clé pour caractériser la liaison entre l'acier et l'alliage d'aluminium. La taille et la nature de la couche intermétallique de l'échantillon sélectionné sont étudiées. Le microscope électronique à balayage est un outil qui permet d'observer des tailles microscopiques. Utilisé en rétrodiffusion corpuscule, il est possible de différencier les éléments légers des éléments plus lourd. Couplé avec une sonde EDS, il est possible de déterminer plus précisément la nature des éléments observés au microscope. Ces outils ont été présentés section I.3.5. La préparation des échantillons et leur inspection au MEB et à la sonde EDS ont été réalisées en partenariat avec le laboratoire SIMAP.

IV.3.5.2. Préparation des échantillons

L'échantillon est découpé en trois. Seule la partie centrale est gardée (Figure 129). Une face sur laquelle se trouve le témoin et la soudure aluminium est polie dans le sens de l'acier vers l'alliage d'aluminium, afin d'éviter le beurrage de l'alliage d'aluminium sur l'acier. L'échantillon n'a pas été mis en résine comme il peut être coutume de le faire afin de favoriser l'évacuation des électrons lors de l'inspection au MEB (Ruste, 2015b). Sous l'effet des efforts trop important de polissage, la soudure n'a pas résisté et le feuillard d'acier s'est détaché. La face polie côté alliage d'aluminium est inspectée au MEB.

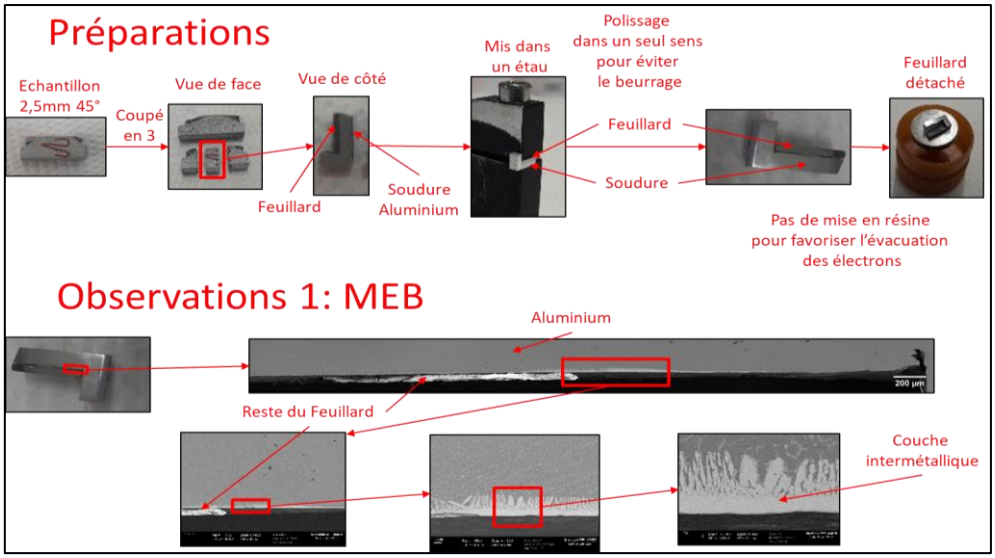


Figure 129 : Processus de préparation de l'échantillon et d'analyse au MEB

IV.3.5.3. Observations des résultats & analyse

Côté alliage d'aluminium, deux zones apparaissent, une claire et une foncée. La zone claire est plus lourde que la zone foncée, car l'échantillon est observé en rétrodiffusion corpuscule. Il s'agit de la couche intermétallique présente entre l'alliage d'aluminium et l'acier. Cette couche est observée à l'endroit où elle est la plus épaisse. A cet endroit, elle s'étend dans la zone foncée (l'alliage d'aluminium) sous forme colonnaire sur 20 µm (Figure 130) et est homogène sur 10 µm.

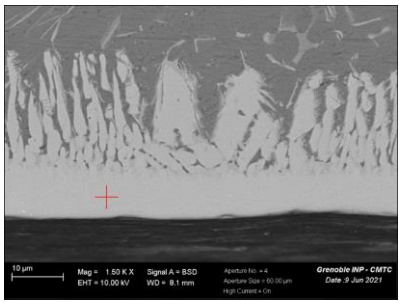


Figure 130 : Vue de l'interface aluminium-acier à l'endroit où elle est la plus large

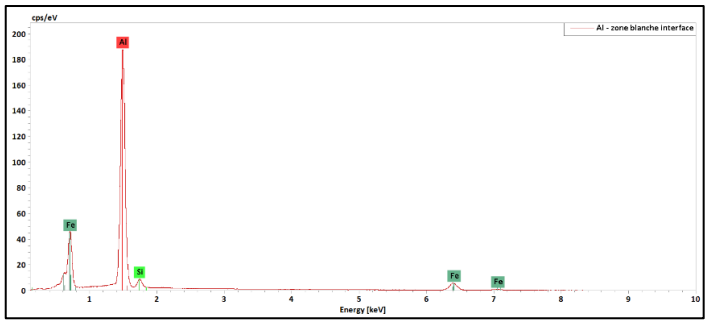


Figure 131: Analyse EDS au point repéré sur Figure 130

Une analyse EDS de la zone claire révèle un mélange fer-aluminium proche du composé bimétallique FeAl3 (Figure 131). En réalisant le rapport entre les aires des pics correspondants au fer et celles correspondants aux pics d'aluminium, un rapport proche de 1/3 est obtenu, ce qui est révélateur de la présence de FeAl3.

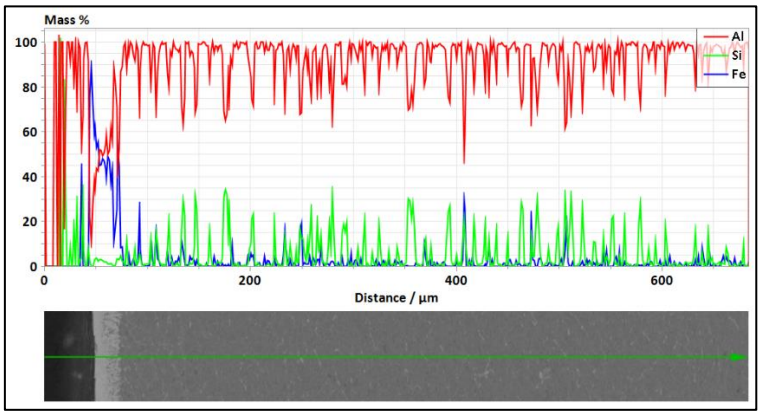


Figure 132 : Analyse EDS Fe, Al, Si le long de la ligne verte de l'interface témoin-soudure vers la soudure

Une analyse EDS sur une ligne traversant, de la zone en gris clair vers la zone en gris foncé est réalisée. Elle révèle une zone intermétallique (zone colonnaire inclue) de l'ordre de 30 µm (Figure 132).

Sur cette zone, le fer et l'aluminium sont à poids égal cela veut dire qu'il y a trois fois plus d'atomes d'aluminium que d'atome de Fer, car le fer à une densité presque trois fois plus importante (7,8 vs 2,7). Il semble donc en effet que la zone intermétallique soit composée de $FeAl_3$.

IV.3.6. Conclusion expériences et analyse

Les expériences présentées ont permis de trouver une configuration torche-témoin permettant d'assurer une liaison témoin-pièce saine. Il a été montré que le témoin n'est pas détérioré par la soudure avec cette configuration et que la liaison est effectivement réalisée par la présence d'une couche intermétallique.

Les soudures ont été réalisées avec un fil de diamètre 1,2 mm ; d'après la bibliographie, l'utilisation d'un fil plus fin pourrait permettre de moins détériorer le témoin mais ralentirait la fabrication de la pièce hôte ou nécessiterait un changement de fil en cours de fabrication.

Les soudures ont été réalisées avec un fil en AlSi5 ; d'après la bibliographie, un fil en AlSi3Mn pourrait réduire la taille de la couche intermétallique afin de réduire sa fragilité. Les paramètres de soudure ont été sélectionnés pour minimiser l'énergie linéique, qui influe fortement sur la couche intermétallique, mais sans la présence du témoin. Une optimisation plus poussée de ces paramètres mais avec la présence du témoin sur la tranche pourrait être réalisée. Enfin, une optimisation plus

approfondie de l'offset entre 2 mm et 2,5 mm permettrait de minimiser de manière plus importante la couche intermétallique.

IV.4. Conclusion et perspectives

L'enjeu de ce chapitre était de prouver que l'enfouissement d'un témoin correspondant aux critères spécifiés par la technologie sélectionnée au Chapitre II au cours du procédé de fabrication d'une pièce massive était réalisable.

Cette étude a permis de définir la configuration pièce-témoin : un témoin en acier galvanisé plaqué verticalement à un échangeur thermique. Une distance torche-témoin adéquate, c'est-à-dire qui ne détériore pas le témoin et qui crée une couche intermétallique suffisante, a été validée par expérimentations. Il a donc été prouvé qu'une insertion de témoin fin en acier galvanisé au sein d'une pièce en aluminium est possible.

Une stratégie d'enfouissement du témoin sous plusieurs cordons a été proposée et mise en œuvre. L'analyse d'un échantillon complètement enfoui avec cette stratégie serait nécessaire afin de valider les résultats présentés précédemment sur un cordon.

Afin de simplifier l'enfouissement du témoin, l'utilisation d'un revêtement aluminium-zinc et non zinc seulement est une piste qui devra être investiguée plus profondément. Pour aller plus loin, si l'épaisseur du revêtement aluminium est suffisamment épaisse pour protéger le témoin de la soudure, l'enjeu revient alors à réaliser de la soudure aluminium-aluminium comme avec une pièce de transition.

Enfin, ce chapitre s'appuie sur une caractérisation matériau de la liaison acier/aluminium. Afin de s'assurer que celle-ci est bien représentative du comportement mécanique de la liaison, un test de traction sur une éprouvette ayant un témoin complètement enfoui devra être réalisé.

Le chapitre suivant s'intéresse à la localisation du témoin au sein de la pièce hôte en fonction de son chargement et de la mesure qui doit être réalisée.

Chapitre V : Sélection et positionnement du témoin de contrainte dans une pièce

La question de recherche « Comment choisir et positionner un témoin dans une pièce en fonction du chargement et de la contrainte à mesurer ? » est traitée dans ce dernier chapitre.

V.1. Objectifs

Le chapitre précédant a montré la faisabilité de l'usage d'un témoin magnétostrictif pour rendre une pièce fabriquée en WAAM intelligente. L'objectif de ce chapitre est de choisir correctement le placement du témoin dans la pièce à rendre intelligente en fonction de son chargement afin de connaitre son état de contrainte.

V.1.1. Périmètre et scénario de mesure

L'objectif est d'obtenir une pièce intelligente monitorant sa contrainte maximale spatiale (notée $\sigma_{maxi_{pièce}}$), c'est-à-dire la contrainte du point de la pièce ayant la contrainte de Von Mises la plus élevée. Cette contrainte est mesurée à l'aide d'un témoin enfoui comme présenté précédemment. Les caractères élasto-plastiques de la pièce hôte et du témoin pourront engendrer des effets mémoires ou des comportements particuliers. Ainsi, il est nécessaire de définir les scénarios d'usage dans lesquelles la contrainte maximale d'une pièce est mesurée.

Divers cas d'usage ont été envisagés pour l'utilisation du capteur. Ainsi, la contrainte maximale spatiale dans une pièce peut être mesurée :

- En temps réel : quand la pièce est chargée et que l'objectif est de connaître son état de contrainte à l'instant t.
- En différé : quand la pièce est déchargée et que l'objectif est de connaître son état de contrainte maximal atteint au cours de sa vie afin de savoir si la pièce a subi une charge trop importante ayant risqué de l'endommager.

La pièce à contrôler en elle-même peut se situer soit :

- Entièrement dans le domaine élastique : la contrainte maximale spatiale est inférieure à la limite d'élasticité du matériau de la pièce.
- Localement dans le domaine plastique : la contrainte maximale spatiale est supérieure à la limite d'élasticité du matériau de la pièce.

Cela donne lieu à quatre scénarios, Tableau 28:

Tableau 28: Scénarios de mesure

Pièce	Mesure	
	En temps réel	En différé
Entièrement élastique	Scénario 1	Scénario 3
Localement plastifiée	Scénario 2	Scénario 4

Le témoin à insérer doit permettre de mesurer la contrainte dans ces divers scénarios de mesure.

Pour faire une mesure en temps réel (scénario 1 et 2), le témoin est soit dans le domaine élastique soit dans le domaine plastique. Afin de maximiser la précision de mesure, il est décidé de ne travailler que dans le domaine élastique. Cette hypothèse de travail est justifiée et étayée section V.2.1.

Pour faire une mesure en différé, une mémorisation de la contrainte est nécessaire. Il y a trois solutions :

1- Utiliser la sonde placée en permanence au droit du témoin et réaliser une mesure en continu en enregistrant à chaque instant la contrainte subie. D'un point de vue du placement du témoin cette solution est traitée comme les scénarios 1 et 2.
2- Utiliser la plastification du témoin pour réaliser un effet mémoire (scénarios 3 et 4)
3- Utiliser la pièce plastifiée pour maintenir le témoin déformé et qu'il serve de mémoire (scénario 4')

Les contraintes imposées par les différents scénarios sont résumées dans le Tableau 29:

Tableau 29: Conditions d'utilisation du témoin pour chaque scénario

la pièce hôte est :	-> **mesure** $\sigma_{maxi_{pièce}}$ AU MOMENT DE LA MESURE	->**mesure** $\sigma_{maxi_{pièce}}$ ATTEINT AU COURS DE SA VIE	
Complètement dans le domaine élastique $\sigma_{maxi_{pièce}} \leq \sigma_{e_{materiau_{pièce}}}$	1) Le témoin doit rester dans son domaine élastique quand la pièce est dans le domaine élastique. $\boldsymbol{\sigma_{témoin} < \sigma_{e_{materiau_{témoin}}}}$	3) Le témoin doit entrer dans le domaine plastique quand la pièce est dans le domaine élastique, ET dès que possible. $\boldsymbol{\sigma_{e_{materiau_{témoin}}} < \sigma_{témoin} < \sigma_{r_{materiau_{témoin}}}}$	
En partie dans Le domaine plastique $\sigma_{e_{materiau_{pièce}}} \leq \sigma_{maxi_{pièce}} < \sigma_{r_{materiau_{pièce}}}$	2) Le témoin doit rester dans son domaine élastique quel que soit le chargement de la pièce qui peut être dans le domaine élastique ou plastique. $\boldsymbol{\sigma_{témoin} < \sigma_{e_{materiau_{témoin}}}}$	4) Mémoire par le témoin Le témoin est dans une zone de la pièce qui reste élastique, il faut que le témoin entre dans le domaine plastique dès que possible. $\boldsymbol{\sigma_{e_{materiau_{témoin}}} < \sigma_{témoin} < \sigma_{r_{materiau_{témoin}}}}$	4') Mémoire par la pièce Le témoin reste dans le domaine élastique et il est pris dans une zone de la pièce plastifiée. $\boldsymbol{\sigma_{témoin} < \sigma_{e_{materiau_{témoin}}}}$

Pour les scénarios 2 et 4', le témoin peut se trouver dans une zone de la pièce ayant plastifié. Cela engendre de très fortes concentrations de contraintes nuisibles à l'utilisation de la pièce intelligente. En effet, dans ce cas-là, quand la déformation du témoin et de la pièce sont égales, la pièce étant dans le domaine plastique, sa contrainte augmente peu en fonction de la déformation, alors que la contrainte dans le témoin augmente fortement en fonction de la déformation, celui-ci étant dans le domaine élastique. Cette forte différence de contraintes engendre de fortes contraintes de cisaillement non voulues (Li et al., 2019). Ainsi, pour le scénario 2, le témoin est placé dans une zone de la pièce n'ayant pas plastifié. Le scénario 4' impose nécessairement le placement du témoin dans une zone plastifiée de la pièce, celui-ci n'est donc ni envisagé ni étudié par la suite.

De plus, pour le scénario 4, localiser le témoin dans une zone de la pièce qui a plastifié, signifie le placer dans une zone fortement contrainte et fragilisée. Donc pour le scénario 4, le témoin est placé, comme pour le scénario 2, dans une zone de la pièce ne s'étant pas plastifiée.

Les différents scénarios imposent des conditions sur les caractéristiques mécaniques du témoin. Afin de respecter ces conditions, des préconisations sur les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé pour le témoin sont formulées dans le Tableau 30. Les seuils correspondant à « faible » et « élevé » sont précisés section V.2.2.3 et dépendent du couple matériaux témoin/pièce.

Tableau 30: Préconisation sur les caractéristiques mécaniques du témoin

	Préconisation sur les caractéristiques mécaniques du témoin	
La pièce hôte est :	**-> mesure temps réel**	**->mesure en différé**
Complètement dans le domaine élastique	1) Choix du matériau du témoin avec $\sigma_{e_{témoin}}$ *élevée* Le témoin ne doit pas se plastifier pour maximiser la sensibilité du capteur	3) Choix du matériau du témoin avec $\sigma_{e_{témoin}}$ *faible* Le témoin doit se plastifier rapidement pour maximiser la plage de mesure $\sigma_{r_{témoin}}$ *élevée*
En partie dans le domaine plastique mais élastique autour du témoin	2) Choix du matériau du témoin avec $\sigma_{e_{témoin}}$ *élevée*	4) Choix du matériau du témoin avec $\sigma_{e_{témoin}}$ *faible* $\sigma_{r_{témoin}}$ *élevée*

Afin de placer correctement le témoin dans une pièce pour pouvoir mesurer la contrainte maximale dans la pièce pour tous ces scénarios, il est nécessaire de comprendre la partie de la chaine de mesure allant du mesurande jusqu'à la sonde.

V.1.2. Chaine de mesure

Cinq étapes différentes ont été identifiées dans la chaine de mesure pour relier la contrainte maximale à mesurer dans la pièce au signal de sortie de la sonde de mesure (Figure 133).

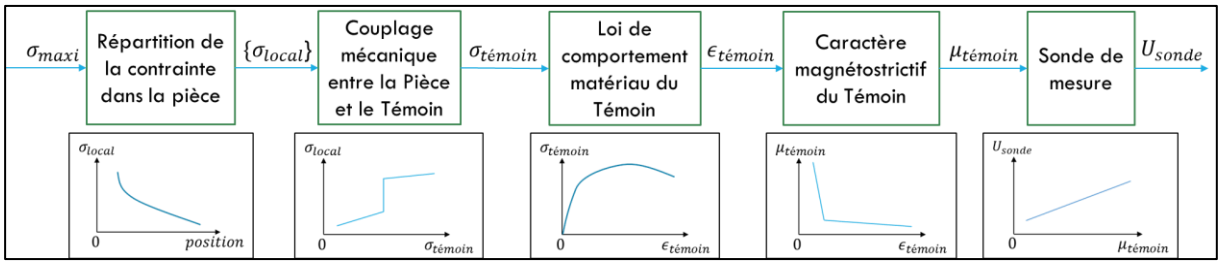


Figure 133: Chaîne de mesure

La sonde mise au point par le laboratoire TIMA délivre un signal qui est fonction de la variation de perméabilité magnétique moyenne du témoin enfoui. Ce bloc n'a pas d'influence sur la méthode de positionnement du témoin.

La variation de la perméabilité magnétique moyenne mesurée en fonction de la déformation moyenne du témoin pour un champ d'excitation magnétique donné est un phénomène étudié et documenté (Gorkunov et al., 2007; Stupakov et al., 2007). Ce phénomène est rarement étudié en fonction de la contrainte.

La loi de comportement du matériau permet de déterminer la contrainte en fonction de la déformation. Elle est utilisée pour lier la déformation moyenne du témoin à la contrainte moyenne du témoin.

La contrainte moyenne du témoin dépend du champ de contrainte local où le témoin est placé.

Les conditions aux limites imposées à la pièce (chargements et déplacements) induisent le champ de contrainte dans celle-ci et donc le lien entre la contrainte maximale spatiale dans la pièce et la contrainte locale, là où le témoin est placé.

Afin de mettre au point une méthode de placement du témoin dans une pièce pour la mesure de la contrainte maximale pour chaque scénario, il est nécessaire de comprendre les contraintes qu'imposent certains « blocs » de la chaine de mesure. Cela est réalisé dans la section suivante.

V.2. Etude de la chaine de mesure

Afin de proposer une méthode de placement du témoin dans la pièce intelligente, il est nécessaire d'avoir une compréhension fine de la chaine de mesure. La sonde de mesure a déjà été étudiée dans la section III.5. La loi de comportement matériau ne sera pas plus présentée. La répartition de la contrainte dans la pièce est réalisée par simulation éléments finis. Deux blocs sont étudiés en détail :

- Le caractère magnétostrictif inverse du témoin
- Le couplage mécanique local entre le témoin et son environnement

V.2.1. Caractère magnétostrictif inverse du témoin

L'objectif est de comprendre le comportement magnétostrictif du témoin dans son domaine élastique et plastique et comment celui-ci peut être utilisé au mieux pour les divers scénarios afin d'optimiser la sensibilité et l'amplitude de mesure du système. Comme cela a été mentionné, deux cas d'usages sont dissociés et sont étudiés par la suite :

- Le témoin est utilisé pour réaliser de la mesure en temps réel (c'est-à-dire pièce en charge)
- Le témoin est utilisé pour de la mesure en différé (sous-entendu pièce déchargée).

V.2.1.1. Analyse du comportement magnétostrictif pour une mesure en temps réel

Le comportement de la perméabilité magnétique des aciers en fonction de la déformation moyenne Figure 96 peut être schématisé par la Figure 134.

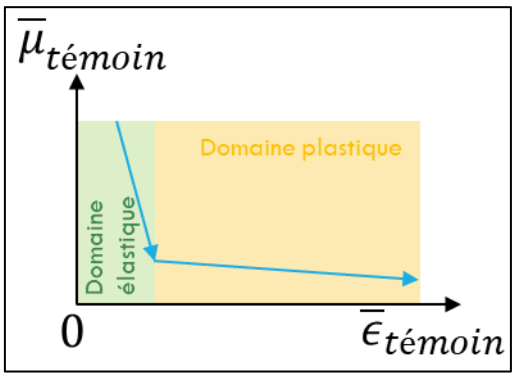


Figure 134: Evolution de la perméabilité magnétique moyenne dans un acier en fonction de sa déformation en charge

Comme cela est visible (Figure 134), la variation de perméabilité des aciers est bien plus importante sur le domaine élastique que sur le domaine plastique. Cela signifie que la sensibilité de la mesure est plus importante dans le domaine élastique.

Le témoin doit rester dans le domaine élastique :

➔ Pour être plus précis en mesure temps réel
➔ Pour ne pas être dans un état de recharge partielle après plastification (section I.4.1)

V.2.1.2. Analyse du comportement magnétostrictif pour une mesure en différé

Afin de réaliser une mesure en différé de la contrainte maximale, la plastification du témoin est utilisée pour son effet mémoire.

Il faut d'une part s'assurer que :

- La déformation permanente du témoin implique une variation permanente de la perméabilité (c'est-à-dire que la perméabilité montre un comportement plastique). Cela a été vérifié dans la section I.4.1.
- La grandeur mesurée puisse être reliée à la contrainte en charge qui en est la cause.

Pour le second point, le témoin subit des contraintes rémanentes lors de la mesure différée. Si la pièce était en traction lors de la mise sous charge, ces contraintes rémanentes sont de compression (et inversement). Il s'agit de contraintes appliquées par le retrait élastique de la pièce (suite à sa décharge) sur le témoin déformé plastiquement. Le lien entre la perméabilité rémanente et la charge ayant conduite à la plastification peut être obtenu par deux approches différentes :

- Approche expérimentale : pour cela des essais de traction sont réalisés pour différentes charges menant à la plastification du témoin. Puis les éprouvettes sont déchargées, alors le témoin subit une contrainte rémanente et sa perméabilité rémanente est mesurée. Cela permet d'obtenir la perméabilité rémanente en fonction de la charge ayant conduit à la plastification.

- Approche numérique : des simulations numériques d'essais de traction sont réalisées, pour différentes charges menant à la plastification du témoin. Puis la décharge est simulée et les contraintes rémanentes de compression dans le témoin sont calculées. Ces simulations permettent de connaitre la contrainte rémanente en fonction de la charge. Il est alors nécessaire de connaitre le lien entre la contrainte rémanente dans le témoin et la perméabilité du témoin. Cela est obtenu de manière expérimentale par la caractérisation en traction compression de la perméabilité du matériau du témoin (cela a été largement traité dans la littérature section III.3.4.2). L'agrégation des résultats permet d'obtenir la perméabilité rémanente en fonction de la charge ayant conduit à la plastification.

Pour les deux approches, il faut ensuite s'assurer que la perméabilité rémanente en fonction de la charge initiale montre un comportement monotone (bijectif), c'est à dire que pour une valeur de perméabilité du témoin enfoui correspond une seule valeur de charge initiale (et inversement).

Dans ce manuscrit, la seconde approche est choisie. En effet, celle-ci ne nécessite pas de caractérisation magnétique d'un témoin enfoui. La caractérisation par simulations par éléments finis de la contrainte rémanente subie par le témoin enfoui est présentée section V.2.2.5.

Lorsque la mesure en différé est réalisée par la plastification du témoin, l'amplitude mesurable dépend du domaine de plasticité du témoin. Ainsi, afin de maximiser la plage de mesure, il faut donc préférablement choisir un témoin ayant une limite d'élasticité la plus faible possible et une résistance à la rupture la plus haute possible.

V.2.1.3. Conclusion intermédiaire

Les différents scénarios de mesure amènent donc à faire des choix sur le témoin à utiliser dès sa caractérisation magnéto-mécanique. Ils ont été résumés Tableau 30.

Ainsi le choix de la limite d'élasticité du témoin dans cette méthode est notamment orienté par son caractère magnétostrictif inverse. L'enjeu est de maximiser la précision et/ou la plage de mesure du dispositif. De plus, le témoin à sélectionner doit avoir un comportement monotone (bijectif) quel que soit le niveau de la contrainte appliquée, et pour cela son produit ($\lambda\sigma$) doit être négatif sur tout son domaine d'utilisation (voir section III.3.4.2)

Il faut maintenant s'assurer que le couplage mécanique entre la pièce hôte et le témoin est possible. L'enjeu est de déterminer la contrainte locale autour du témoin à partir de la contrainte moyenne dans le témoin et inversement de prédire la contrainte dans le témoin à partir d'une contrainte locale dans une pièce afin de pouvoir le positionner dans la pièce.

V.2.2. Couplage mécanique entre le témoin et son environnement

La contrainte moyenne dans le témoin peut donc être estimée à partir de la perméabilité mesurée en différé ou en temps réel. L'objectif est maintenant d'établir un abaque reliant la contrainte moyenne dans le témoin en fonction de la contrainte dans la pièce hôte là où doit être placé le témoin. Cela pourrait être réalisé de manière expérimentale à l'aide de la sonde de mesure mais nécessiterait un grand nombre d'essais. C'est pourquoi l'abaque de couplage mécanique est obtenu en utilisant une simulation numérique.

L'abaque est réalisé sur un cas simple standard : un témoin enfoui dans une éprouvette en traction (Figure 135). L'éprouvette a une épaisseur h = 3 mm et une largeur c = 20 mm. Le témoin est un cylindre d'épaisseur e = 0,55 mm et de diamètre D = 8 mm inséré au centre de l'éprouvette. Ces abaques sont réalisés pour deux matériaux de témoin différents permettant de couvrir les quatre scénarios :

- Un acier à haute limite d'élasticité
- Un acier à faible limite d'élasticité

Les caractéristiques de ces aciers sont données dans le Tableau 31. Les abaques sont établis pour un matériau de pièce hôte donné. Un alliage d'aluminium de la série 4000 est choisi, il a été montré au Chapitre III qu'ils étaient adaptés pour être soudés sainement avec des témoins en acier. Les alliages de la série 4000 ont des limites d'élasticité et de rupture couvrant les plages (45 MPa - 493 MPa) et (110 MPa - 427 MPa) respectivement (matweb.com, 2016). Afin de couvrir tous les scénarios, un alliage ayant des propriétés mécaniques élevées est choisi et ses caractéristiques sont données également dans le Tableau 31.

V.2.2.1. Modèle numérique

Le modèle numérique peut être simplifié par rapport au modèle réel car :

- Au sein de la zone calibrée d'une éprouvette de traction la contrainte est homogène
- L'ensemble formé par l'éprouvette et le témoin présente trois plans de symétrie

Ainsi, seul un huitième du centre de la zone calibrée de l'éprouvette est simulée. Les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés dans l'étude sont décrites Tableau 31 suivant un modèle élasto-plastique bilinéaire.

Tableau 31: Caractéristiques mécaniques des matériaux testés

Matériau		E (MPa)	ν	σ_e (MPa)	E_T (MPa)	σ_r (MPa)	A (%)
Aluminium :	**Défaut (Al 4000)**	71 000	0,33	280	205	310	15
Acier fort :	**HX460**	200 000	0,29	510	471	570	13
Acier faible :	**DX51D**	200 000	0,29	140	1227	385	20

Des congés de raccordement de 0,1 mm de rayon entre la tranche et les faces du cylindre ont été réalisées afin d'éviter les aberrations numériques Figure 138. Les conditions aux limites du modèle sont ainsi décrites Figure 137. Il n'y a pas de mouvement relatif entre le témoin et la pièce hôte : l'interface est considérée comme parfaite. Une force est appliquée de manière uniforme sur une des faces du modèle pour observer les contraintes en charge puis enlevée pour regarder les contraintes rémanentes. Les caractéristiques du maillage des diverses simulations réalisées pour caractériser le couplage mécanique sont présentées Tableau 32.

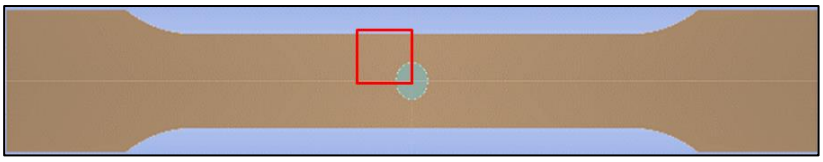


Figure 135 : Vue en coupe longitudinale de l'éprouvette pour la caractérisation du couplage mécanique témoin-pièce avec isolation de l'environnement autour du témoin

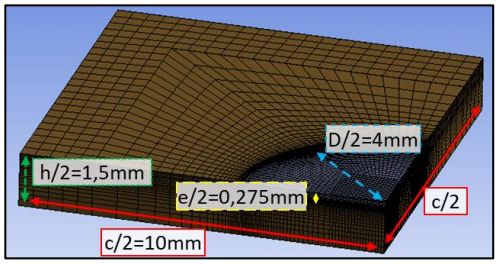


Figure 136 : Dimensions du modèle

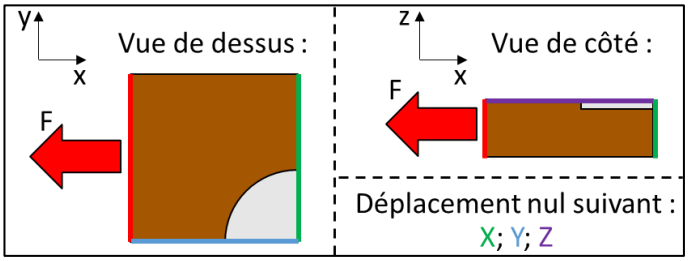


Figure 137: Conditions aux limites du modèle

Tableau 32: Caractéristiques du maillage

Ordre du Maillage	linéaire
Type de Maillage	hexaédrique
Taille d'arrête du plus petit élément	0,01mm
Grands déplacements	activé

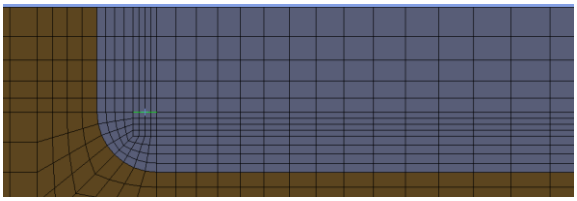


Figure 138: Zoom sur l'interface témoin-pièce au niveau du congé (rayon du congé : 0,1 mm ; ligne surlignée : 0,04 mm)

V.2.2.2. Grandeurs surveillées

a) Contrainte de Von Mises

Le critère de Von Mises est utilisé dans les simulations réalisées pour estimer la contrainte dans le témoin et dans la pièce hôte. Ce critère permet d'agréger les six grandeurs différentes décrivant l'état de contrainte en un point en un seul critère à comparer aux limites d'élasticité et de rupture en traction des différents matériaux.

b) Contrainte moyenne

Le capteur mesure une grandeur qui est fonction d'un état de contrainte moyen dans le témoin, donc seule la valeur moyenne de la contrainte de Von Mises dans le témoin est observée. Les éventuelles concentrations de contraintes numériques dans le témoin sont ainsi minimisées.

V.2.2.3. Abaque de couplage mécanique

Les abaques sont tracés de la manière suivante : pour chaque point de la courbe, qui correspond à un chargement F donné :

- La contrainte moyenne dans une éprouvette sans témoin est calculée ($\sigma_{local} = \frac{F}{S}$)
- Une simulation de l'éprouvette ayant le témoin inclus est réalisée pour le même chargement F et la contrainte moyenne dans le témoin est relevée.

Les abaques présentent l'évolution de la contrainte dans l'éprouvette sans témoin en fonction de la contrainte moyenne dans le témoin pour le même chargement. Les figures 139 et 140 présentent ces abaques respectivement pour un acier à haute limite d'élasticité et à faible limite d'élasticité.

Les abaques obtenus à partir des simulations réalisées suivent deux tendances en fonction de la limite d'élasticité du témoin choisi.

Pour les scénarios 1 et 2, le témoin a une forte limite d'élasticité. La limite d'élasticité de la pièce hôte est donc atteinte localement en premier. Cela correspond à la Figure 139. Dans les scénarios 1 et 2, le témoin et l'environnement local du témoin restent dans le domaine élastique, ce qui correspond à la courbe orange.

Pour les scénarios 3 et 4, la limite d'élasticité du témoin est faible. Le témoin plastifie localement avant la pièce hôte et la pièce reste élastique localement autour du témoin. Cela correspond à la courbe verte sur la Figure 140 en charge. Lorsque la pièce est déchargée pour réaliser la mesure en différé, des contraintes rémanentes de compression apparaissent sur le témoin plastifié. Celles-ci sont tracées Figure 141 par rapport à la contrainte de l'environnement local en charge qui a donné lieu à ces contraintes rémanentes. Ainsi le comportement souhaité est décrit par la courbe verte Figure 140 lorsque la pièce est en charge et correspond à la courbe orange et verte Figure 141 lorsque la pièce est déchargée.

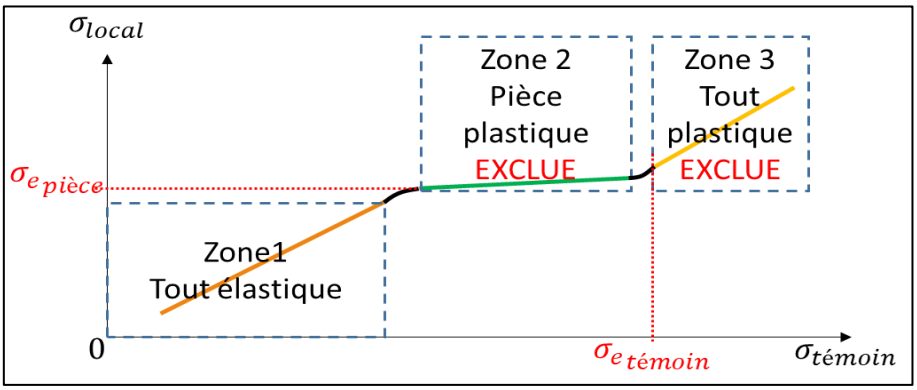


Figure 139: Abaque pour scénarios 1 et 2 : limite d'élasticité du témoin élevée

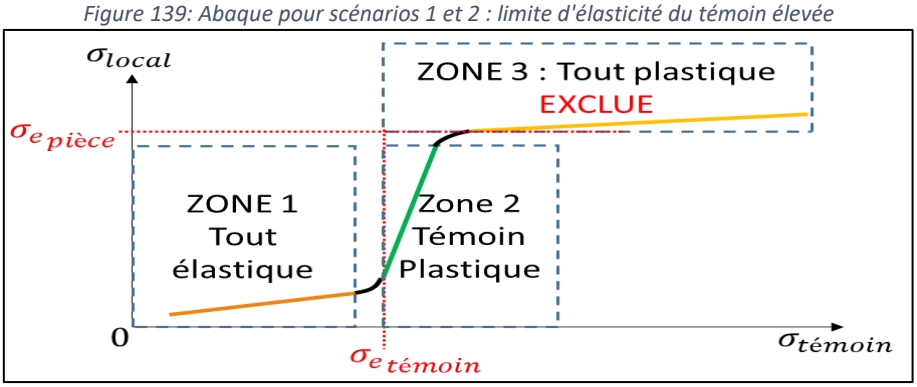


Figure 140 : Abaque pour scénarios 3 et 4 : limite d'élasticité du témoin faible

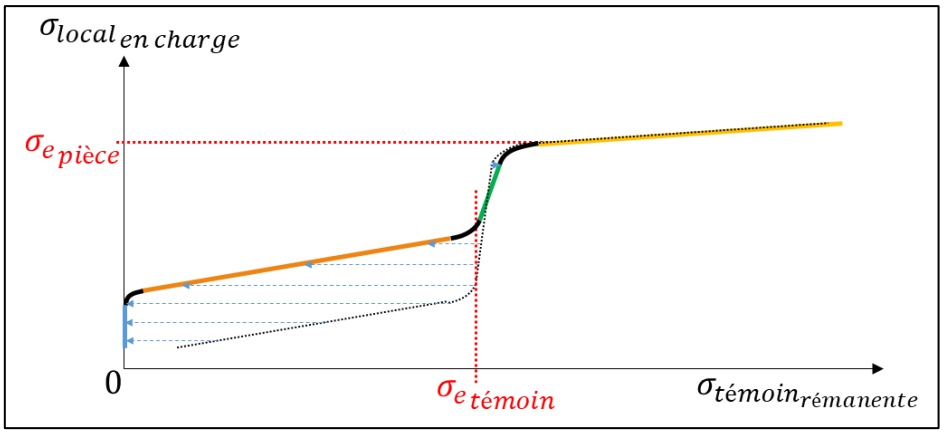


Figure 141 : Contrainte rémanente du témoin en fonction de la contrainte locale en charge (contrainte du témoin en charge en pointillé noir, décharge en bleu)

Les zones 3 représentent des modes de fonctionnement où le témoin et son environnement local sont tous les deux plastifiés : ces modes ont été exclus section V.1.1. La zone 2 de l'abaque des scénarios 1 et 2 (Figure 139) représente un mode de fonctionnement où la pièce s'est plastifiée autour du témoin : ce mode a été exclu section V.1.1.

Sur les deux types de courbes, la première zone identifiée correspondant au cas où le témoin et son environnement local sont tous deux sur leur domaine élastique. Dans cette zone identifiée sur les courbes (Figure 139 et Figure 140) en orange, la relation liant la contrainte locale et la contrainte dans le témoin est linéaire : $\sigma_{local} = \alpha * \sigma_{témoin}$. Il est observé que cette pente α est quasi-identique quelles que soient les limites d'élasticité des deux matériaux pris en compte pour la charge. Cela s'explique notamment par le fait que dans tous ces cas les aciers et les aluminiums modélisés ne changent pas de module de Young ou de coefficient de poisson.

La seconde zone identifiée, est celle surlignée en vert sur les courbes (Figure 139 et Figure 140). Elle correspond à une zone ou soit seule la pièce (Figure 139) soit seul le témoin (Figure 140) s'est plastifié. Cette zone correspond à une relation affine entre la contrainte dans le témoin et son environnement local : $\sigma_{local} = \beta_1 + \beta_2 * \sigma_{témoin}$.

Les transitions entre les différentes zones identifiées par des courbes noires correspondent aux zones où soit le témoin soit l'environnement commencent à se plastifier. Dans ces zones, la contrainte dans certains éléments est supérieure à la limite d'élasticité mais pas la contrainte moyenne.

Il est ainsi possible en connaissant ces pentes et la limite d'élasticité de la pièce hôte de choisir avec précision la limite d'élasticité du témoin ainsi que la limite à la rupture du témoin en fonction du scénario souhaité pour que sa limite d'élasticité soit atteinte localement avant ou après la limite d'élasticité de la pièce hôte et que sa limite à la rupture soit atteinte après la plasticité de la pièce hôte (Tableau 33).

Tableau 33: Bornes définissant la limite d'élasticité du témoin pour chaque scénario

Pièce :	Mesure	
	En temps réel Témoin non plastifié	En différé Témoin plastifié
Entièrement élastique	**Scénario 1** $\sigma_{e_{témoin}} > \sigma_{e_{pièce}}/\alpha$	**Scénario 3** $\sigma_{e_{témoin}} < \sigma_{e_{pièce}}/\alpha$ $\sigma_{r_{témoin}} > \frac{\sigma_{e_{pièce}} - \beta_1}{\beta_2}$
Localement plastifiée élastique autour du témoin	**Scénario 2** $\sigma_{e_{témoin}} > \sigma_{e_{pièce}}/\alpha$	**Scénario 4** $\sigma_{e_{témoin}} < \sigma_{e_{pièce}}/\alpha$ $\sigma_{r_{témoin}} > \frac{\sigma_{e_{pièce}} - \beta_1}{\beta_2}$

De plus, grâce à ces abaques, il est possible de connaître la contrainte locale en charge dans la pièce autour du témoin à partir de la contrainte en charge, ou à partir de la contrainte rémanente du témoin en fonction du scénario choisi.

Afin de réaliser ces abaques, une définition de « la contrainte locale » a été choisie. La section suivante étudie l'influence de cette définition sur les abaques réalisés.

V.2.2.4. Influence de l'environnement local

Diverses études sont réalisées pour qualifier l'influence de la définition du local dans les abaques réalisés. L'influence de l'environnement local est étudiée seulement sur un abaque correspondant à l'acier à faible limite d'élasticité en charge (identique à la Figure 140).

Comme précédemment, les abaques sont calculés et tracés pour des parallélépipèdes ayant les dimensions suivantes (c*c*h) :

- 20 mm*20 mm*6 mm
- 20 mm*20 mm*3 mm (dimensions nominales)
- 16 mm*16 mm*3 mm

Au centre de chacun de ces volumes est inclue la pastille témoin (D = 8 mm ; e = 0,55 mm). Les abaques de couplage obtenus pour chacun de ces pavés sont présentés (Figure 142)

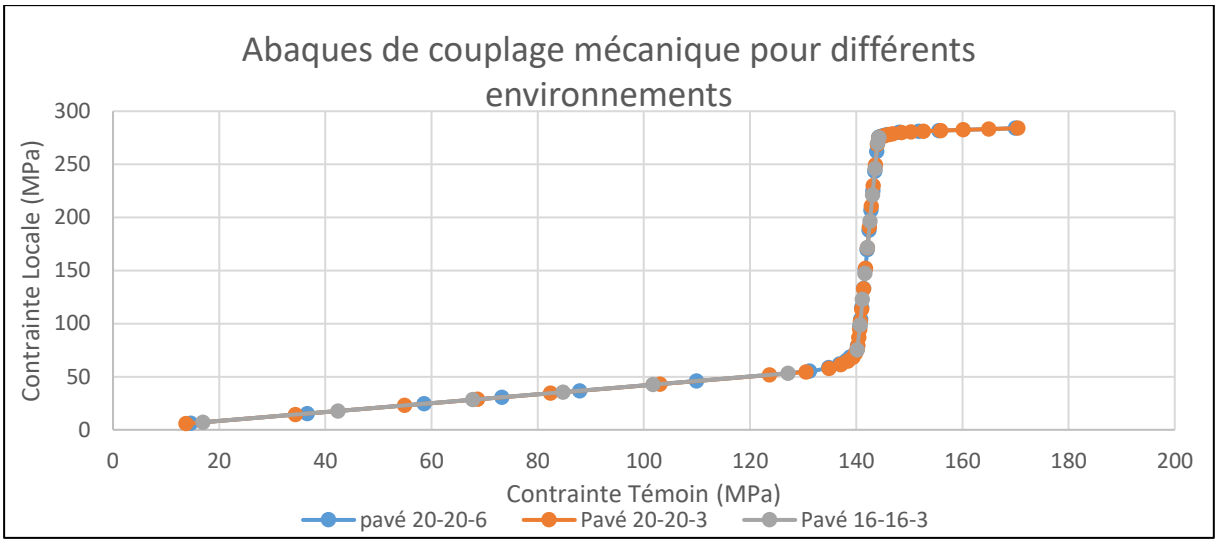


Figure 142 : Abaques de couplage mécanique pour les trois environnements étudiés

Les valeurs des pentes alpha et beta sur chacune de ces abaques sont calculées et présentées Figure 143.

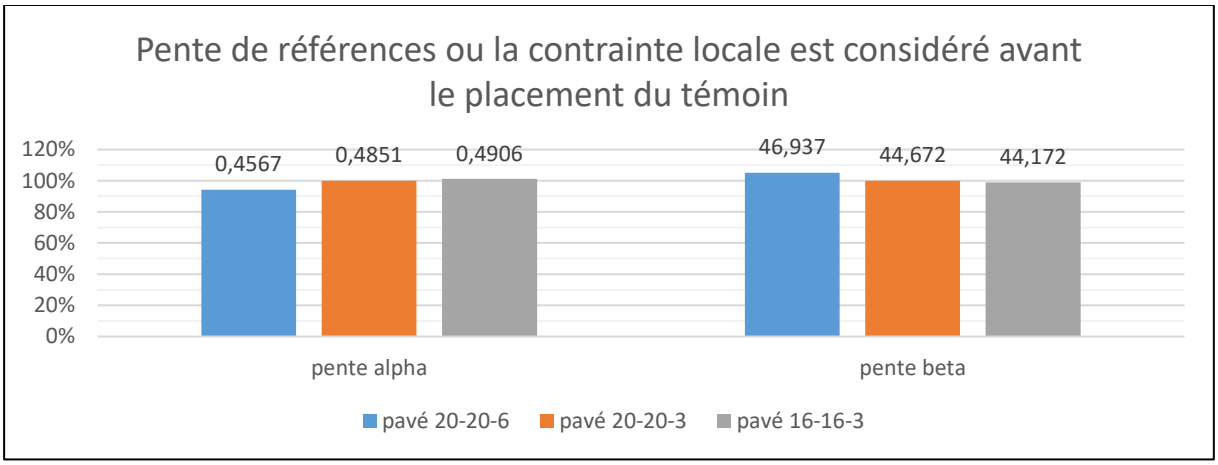


Figure 143: Pentes alpha et beta des abaques pour différentes définitions du local pour un témoin à faible limite d'élasticité (100 % : $\alpha = 0{,}4851$ & $\beta_2 = 44{,}672$)

L'abaque correspondant au tracé de la contrainte sans témoin dans un pavé 20 mm*20 mm* 3 mm par rapport à la contrainte dans le témoin lorsqu'il est enfoui dans ce même pavé est utilisé pour la suite. Ce choix permet de maximiser la matière sur le pourtour du témoin et ainsi de se rapprocher de contions d'enfouissement dans une pièce plus grande. Ce choix permet également de minimiser la matière représentée en-dessus et en dessous du témoin. Ainsi l'hypothèse d'uniformité de la contrainte est valable sur une faible épaisseur ce qui permet à l'abaque d'être utilisée dans plus de cas différents.

V.2.2.5. Choix des abaques de couplage

Les abaques de couplage utilisés pour les différents scénarios et pour les matériaux présentés sont tracés Figure 144 et Figure 145. La première figure est un abaque de couplage pour les scénarios 1 et 2 donc avec un acier de haute limite d'élasticité, la contrainte témoin est calculée en charge. La seconde figure est un abaque de couplage pour les scénarios 3 et 4 donc avec acier de faible limite d'élasticité, la contrainte témoin est calculée en rémanence. La répartition de la contrainte dans le modèle éléments finis, calculée sur un point de calcul de la Figure 145, entouré en rouge, est présentée Figure 146 et Figure 147.

L'acier utilisé pour les scénarios 1 et 2 est sélectionné pour avoir la plus haute limite d'élasticité possible pour une épaisseur de 0,55 mm. La Figure 144 représente essentiellement la première zone où le témoin et son environnement sont dans le domaine élastique. Cependant la limite d'élasticité du témoin n'est pas assez importante et il se plastifie avant son environnement. Ce témoin doit donc être placé dans une zone moins contrainte de manière à ce qu'il ne plastifie pas.

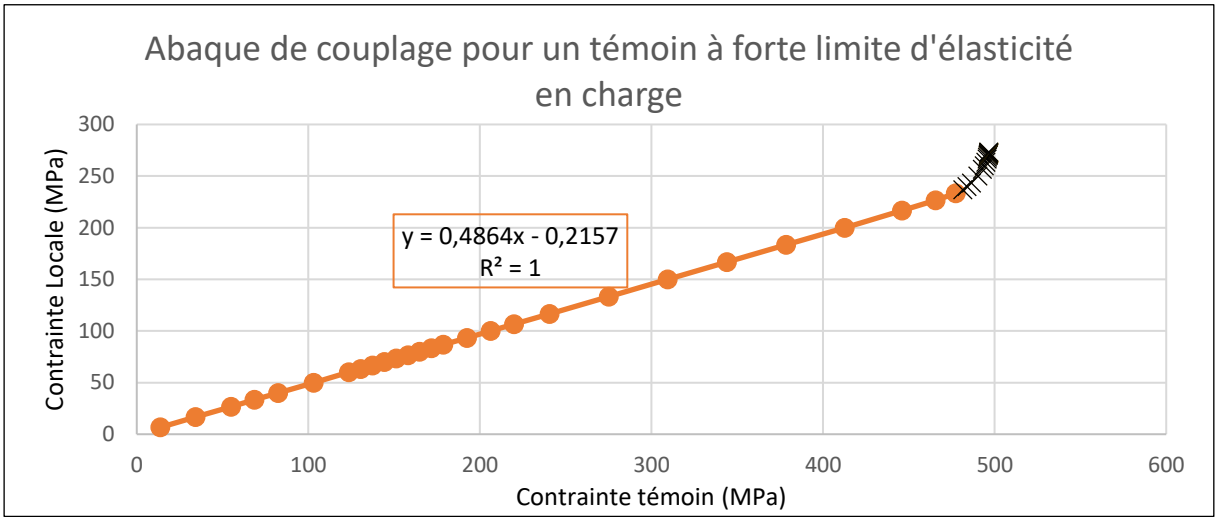


Figure 144 : Abaque de couplage pour un témoin à forte limite d'élasticité

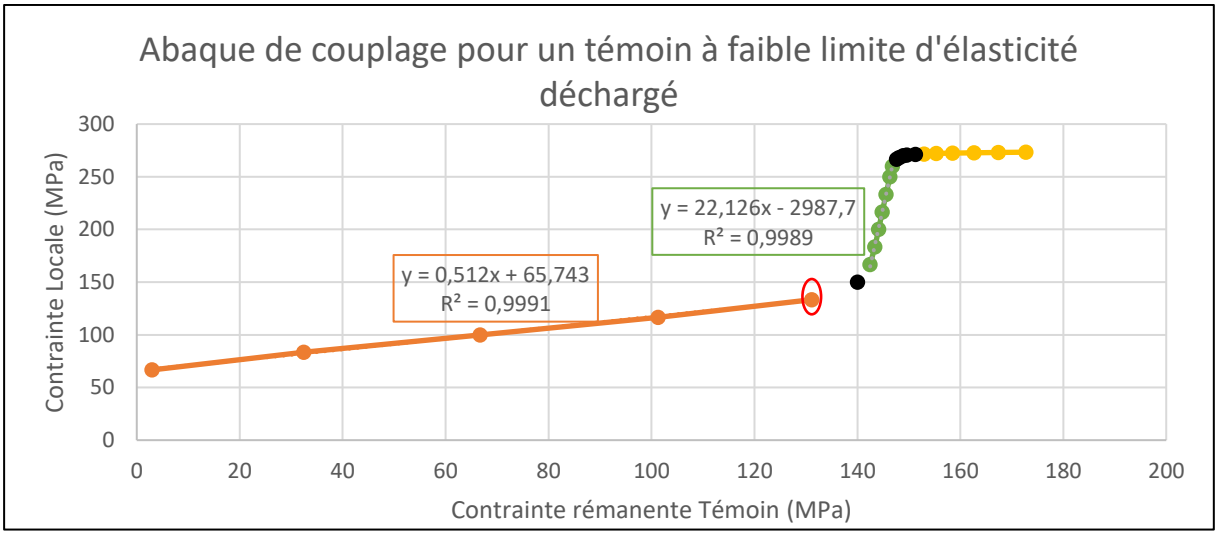


Figure 145 : Abaque de couplage pour un témoin à faible limite d'élasticité déchargé

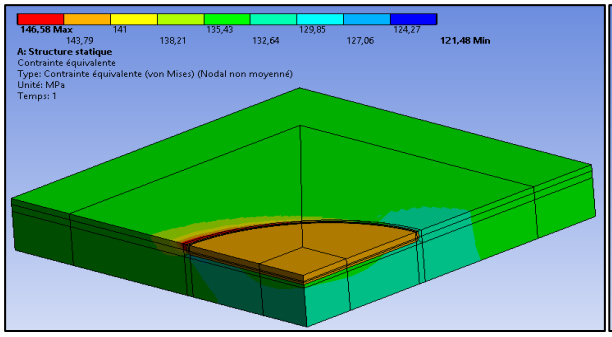


Figure 146: Répartition de la contrainte en charge pour le point entouré Figure 145

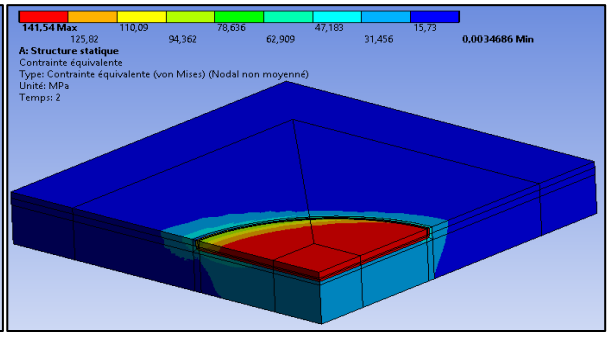


Figure 147: Répartition de la contrainte en rémanence pour le point entouré Figure 145

V.2.2.6. Conclusion abaques de couplage mécanique

L'étude du couplage mécanique entre le témoin et son environnement local permet de comprendre comment la contrainte dans le témoin évolue en fonction de la contrainte moyenne dans son environnement. Deux comportements sont identifiés en fonction de la limite d'élasticité du témoin étudié.

Cette étude ne représente pas la couche intermétallique qui peut impacter les performances mécaniques de la liaison lorsque celle-ci est trop épaisse. Cette couche ne peut être représentée dans l'étude car elle est trop mince (10 µm) par rapport aux dimensions mises en jeu.

Il est également à noter que les abaques réalisés ont été choisis pour un environnement en traction uniforme. Ces abaques ne sont donc utilisables que pour un témoin qui doit être localisé dans un environnement qui est en traction uniforme.

V.2.3. Conclusion de l'étude de la chaîne de mesure

Quatre scénarios de mesures ont été identifiés à partir de la définition de la chaîne de mesure du capteur. Pour chacun de ces scénarios, des préconisations sur le choix du matériau ont été formulées et des abaques caractérisant le couplage mécanique entre le témoin et la pièce ont été établis.

L'ensemble de la chaine de mesure est ainsi caractérisé. La méthode complète de placement est décrite et illustrée section suivante.

V.3. Méthode de placement et détermination de la contrainte maximale

La méthode de placement est présentée et illustrée pour chaque scénario sur une poutre en flexion.

V.3.1. Modèle d'illustration : Poutre encastrée libre en flexion

Une poutre encastrée libre en flexion est utilisée pour illustrer la méthode de placement pour divers scénarios. Seule la moitié de la poutre est modélisée en exploitant le plan de symétrie (xy). Les dimensions de ce modèle sont décrites Figure 148. Les conditions aux limites sont illustrées Figure 149. Le maillage est décrit Tableau 34 et Figure 150. La poutre est réalisée avec l'aluminium présenté Tableau 31.

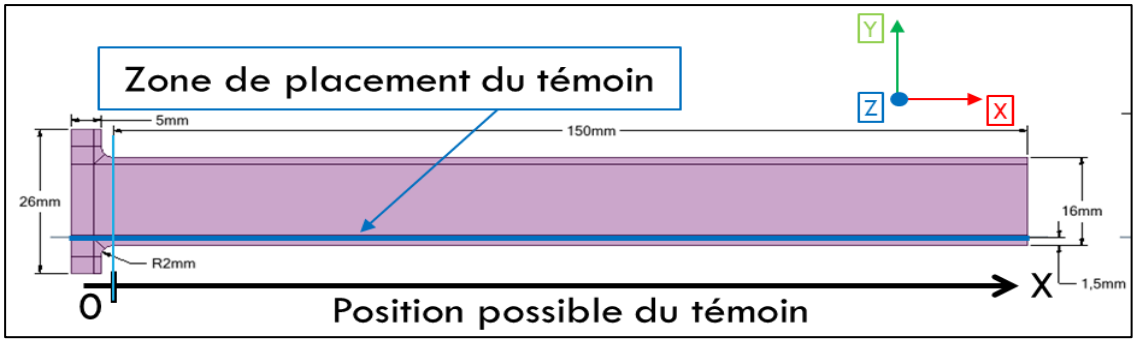


Figure 148 : Dimensions de la demi-poutre d'épaisseur 8mm

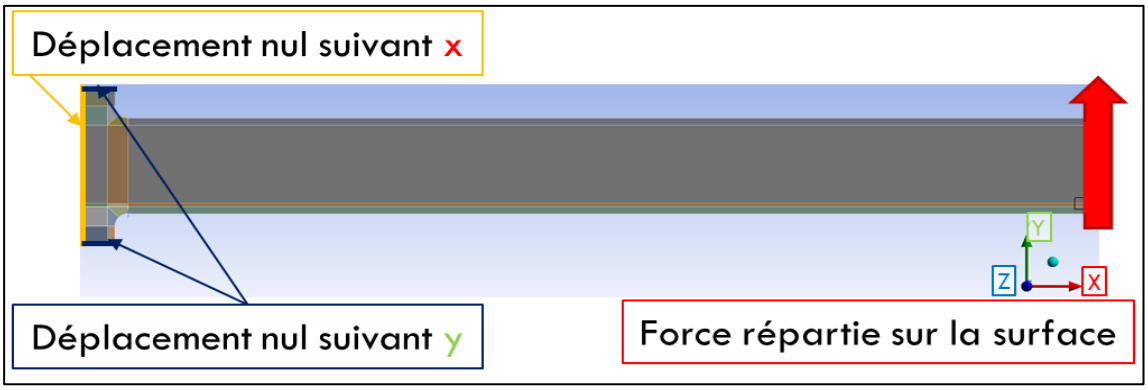


Figure 149: Conditions aux limites de la poutre

Tableau 34: Détail maillage poutre

Ordre du maillage	linéaire
Type de maillage	hexaédrique
Nombre d'éléments	31116
Taille d'arrête du plus petit élément	0,14 mm
Grands déplacements	activé

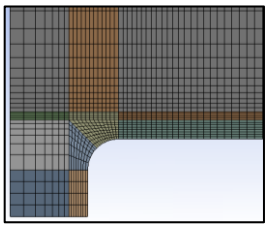


Figure 150 : Zoom sur le maillage au niveau du congé

La zone de placement du centre du témoin est une ligne, intersection entre le plan de symétrie de la poutre (plan (0,X,Y)) et un plan de normal y situé à 1,5 mm de la surface inférieur de la poutre (voir Figure 148).

V.3.2. Méthode

La méthode de placement du témoin se divise en cinq étapes :

- Choix du scénario
- Choix du matériau du témoin
- Simulation à la limite d'utilisation du scénario
- Traduction en contrainte témoin
- Choix du placement du témoin

V.3.2.1. Choix du scénario

La première étape de la méthode de placement consiste à identifier le scénario de mesure souhaité pour la pièce à rendre intelligente. A des fins d'illustrations, les 4 scénarios sont appliqués dans la suite de la description de la méthode.

V.3.2.2. Choix du matériau du témoin

Le choix du matériau du témoin doit être fait selon les recommandations du Tableau 33. Ce tableau définit un seuil optimal pour la limite d'élasticité du témoin (seuil maximal ou minimal en fonction du scénario). Ce seuil est défini par $\sigma_{e_{pièce}}/\alpha$.

Pour le cas d'illustration, ce seuil est de 577 MPa. Pour les scénarios 3 et 4, la limite d'élasticité du témoin doit être inférieure à ce seuil. Un acier DX51D présenté Tableau 31 ayant une faible limite d'élasticité (140 MPa) est choisi. Pour les scénarios 1 et 2, la limite d'élasticité du témoin doit être supérieur à ce seuil. Néanmoins, pour des épaisseurs de 0,55 mm, il n'existe pas d'acier galvanisé avec cette caractéristique (arcelormittal.com, 2021). Un acier HX460 est choisi (Tableau 31), celui-ci possède la plus grande limite d'élasticité connue. Cela impose de placer le témoin dans une zone moins contrainte (donc moins optimale), la sensibilité est donc réduite.

V.3.2.3. Simulation à la limite d'utilisation du scénario

L'objectif de cette étape est d'obtenir la contrainte locale pour une pièce sans témoin en tout point de la future zone de placement lorsque la pièce est chargée à la limite du domaine d'utilisation du scénario. Pour les scénarios 1 et 3, cette charge (F=770 N) entraine une contrainte maximale inférieure ou égale à la limite d'élasticité la pièce (Figure 152). Pour les scénarios 2 et 4, cette charge (F=2080 N) entraine une contrainte maximale inférieure ou égale à la limite à la rupture de la pièce (Figure 154).

La contrainte locale est calculée pour chaque point de la zone de placement comme la moyenne des contraintes équivalentes de Von Mises des nœuds compris dans un pavé centré sur le point considéré dans lequel est inscrit le témoin. Il s'agit donc d'un volume de 8mm*8mm*0,55mm.

Les résultats de cette étape pour le modèle d'illustration sont donnés Figure 151 et Figure 153.

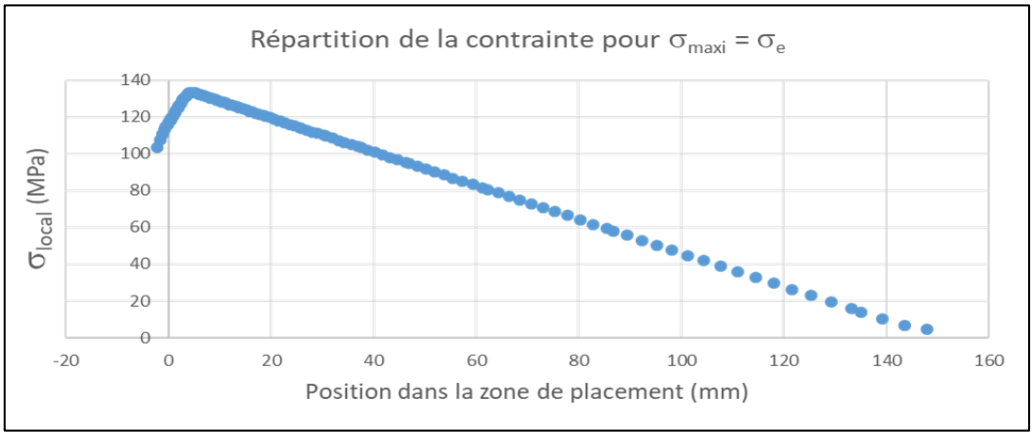


Figure 151: Répartition de la contrainte dans la zone de placement pour $\sigma_{maxi} = \sigma_e$ (pour les scénarios 1 et 3)

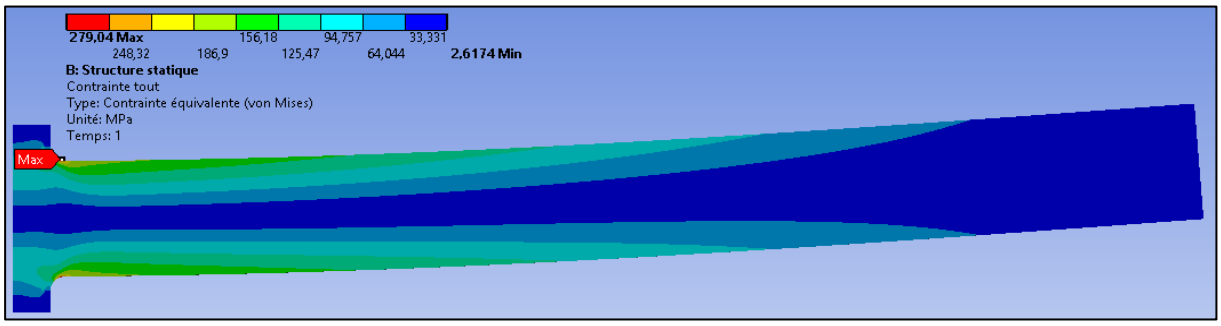


Figure 152: Répartition de la contrainte dans la poutre lorsque celle-ci a faiblement plastifié (F=770N)

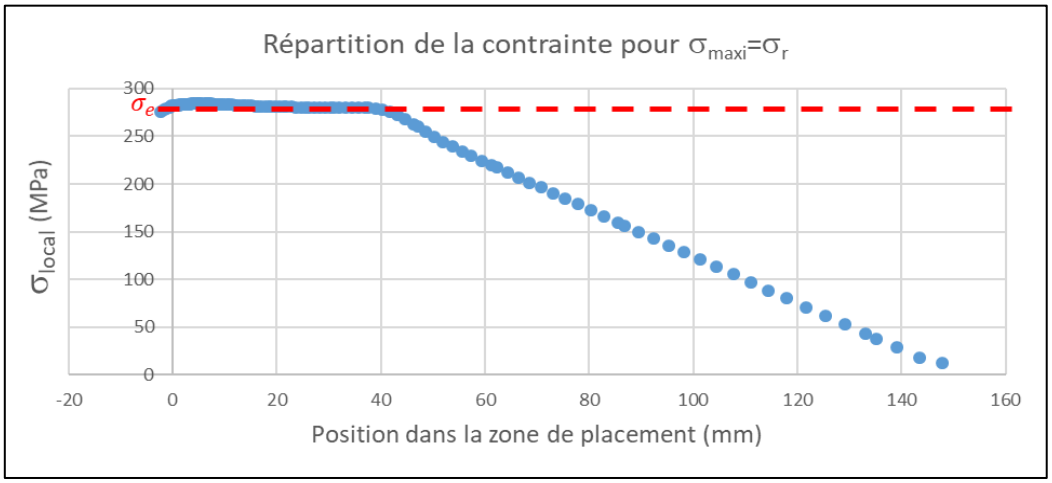


Figure 153: Répartition de la contrainte dans la zone de placement pour $\sigma_{maxi} = \sigma_r$ (pour les scénarios 2 et 4)

Le maximum de contrainte dans la zone de placement est atteint à une abscisse de 5 mm comme cela peut être observé Figure 151. Lorsque la poutre est amenée à la rupture Figure 154, elle est plastifiée sur 40 mm dans la zone de placement. La contrainte évolue donc faiblement dans cette zone comme cela peut être remarqué Figure 153.

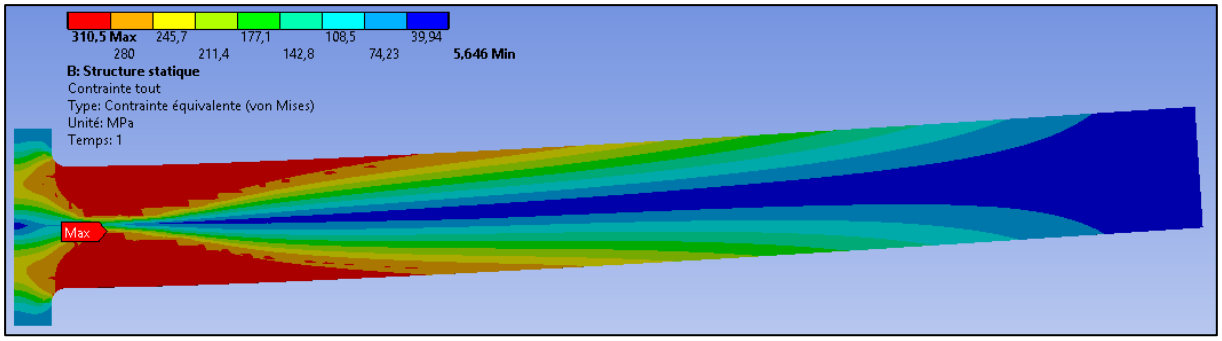


Figure 154: Répartition de la contrainte dans la poutre lorsque celle-ci a fortement plastifié (F=2080N)

V.3.2.4. Traduction en contrainte témoin

L'objectif de cette étape est d'évaluer la contrainte que subira le témoin pour chaque position potentielle du témoin dans la zone de placement. La contrainte dans la zone de placement pour les scénarios 1 et 2 est traduite en contrainte subie par un témoin ayant une forte limite d'élasticité grâce aux abaques sélectionnés section V.2.2, Figure 144. La contrainte dans la zone de placement pour les scénarios 3 et 4 est traduite en contrainte rémanente, subie par un témoin de faible limite d'élasticité grâce à l'abaque Figure 145.

Le résultat de cette opération est l'évolution de la contrainte dans le témoin en fonction de sa position possible dans la zone de placement. Elle est décrite pour les scénarios 1 et 3, donc pour un chargement amenant la pièce à la limite d'élasticité, sur la Figure 155 et pour les scénarios 2 et 4, donc pour un chargement amenant la pièce à la limite à la rupture, sur la Figure 156.

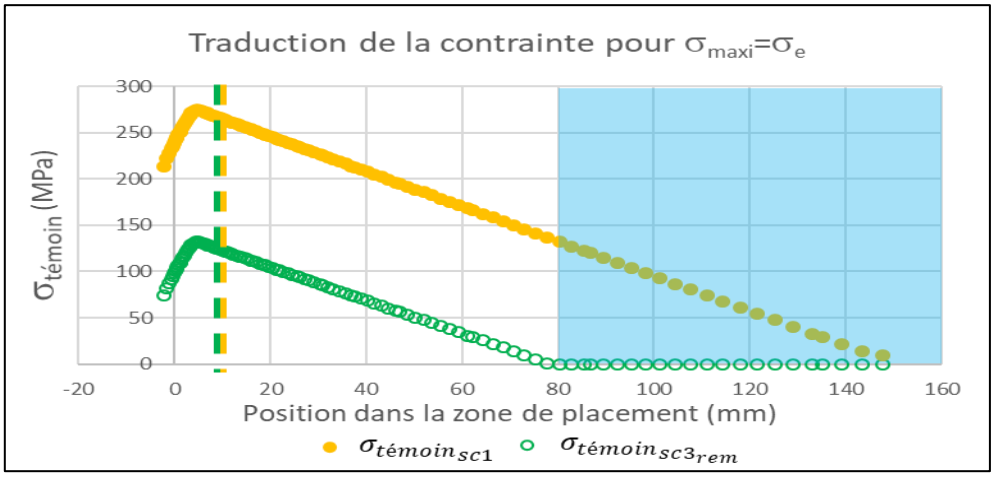


Figure 155: Traduction de la contrainte dans la zone de placement pour les scénarios 1 et 3

Sur la Figure 155, la contrainte traduite pour le témoin de haute limite d'élasticité (en jaune) n'est jamais au-delà de sa limite d'élasticité et reproduit la variation de contrainte dans la poutre de manière fidèle. La contrainte traduite en rémanence pour le témoin de faible limite d'élasticité (en vert) est nulle au-delà de 80 mm car la contrainte dans le témoin en charge ne dépasse pas sa limite d'élasticité.

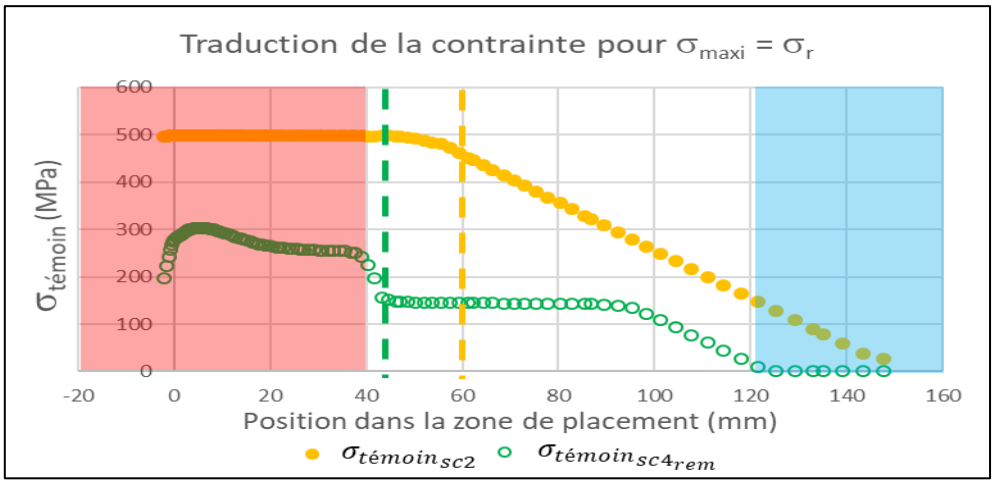


Figure 156: Traduction de la contrainte dans la zone de placement pour les scénario 2 et 4

Sur la Figure 156, la poutre est plastifiée entre 0 mm et 40 mm et donc la contrainte évolue faiblement et cela est visible dans la traduction de la contrainte pour le témoin de haute limite d'élasticité (en jaune). Entre 40 mm et 60 mm, le témoin commence à se plastifier et donc la contrainte évolue plus faiblement. La contrainte traduite au-delà de 60 mm pour le témoin reproduit la variation de contrainte dans la poutre de manière fidèle.

La contrainte traduite en rémanence pour le témoin de faible limite d'élasticité (en vert) est nulle au-delà de 120 mm car la contrainte dans le témoin en charge ne dépasse pas sa limite d'élasticité. La contrainte en rémanence est inférieure à sa limite d'élasticité entre 95 et 120 mm et est supérieure à celle-ci entre 40 mm et 95 mm et évolue donc peu. En dessous de 40 mm le témoin et la pièce sont tous deux complètement plastifiés.

V.3.2.5. Choix du placement

Pour tous les scénarios, afin de maximiser la sensibilité du témoin (scénario 1 et 2) et sa plage de mesure (scénario 3 et 4), il faut placer le témoin dans la zone la plus contrainte possible. Néanmoins, d'autres contraintes sont à prendre en compte.

Pour les scénarios 2 et 4, le témoin ne doit pas être pris dans une zone de plastification. Pour le modèle d'illustration, il doit être placé au-delà de 40 mm, donc hors de la zone rouge (Figure 156).

Pour les scénarios 3 et 4, le témoin doit être placé dans une zone dans laquelle il est plastifié. Pour le modèle d'illustration, il doit être placé hors des zones bleues (Figure 155 et Figure 156).

Afin de ne pas fragiliser la pièce dans une zone critique, pour tous les scénarios, une marge de sécurité est conseillée. Dans notre cas d'illustration, le témoin est placé 5 mm en retrait de la zone critique.

La position du témoin pour chaque scénario est donc choisie et spécifiée Figure 155 et Figure 156 par un trait en pointillés de la couleur du scénario. La position du témoin pour les scénarios 1 et 3 est à 10 mm (soit à 5 mm de la contrainte témoin maximale), à 60 mm pour le scénario 2 et à 45 mm pour le scénario 4.

V.3.3. Procédure de lecture de la grandeur recherchée à partir de la contrainte témoin

Le placement du témoin a été établi pour le chargement maximal à la limite d'utilisation du scénario. Cependant, la pièce intelligente peut être utilisée sur tout son domaine donc pour une

contrainte maximale évoluant sur tout son domaine d'utilisation. Ainsi, il est nécessaire d'établir le lien entre la contrainte locale et la contrainte maximale pour tout chargement du domaine.

Pour le scénario 1 et 3 dans lequel la pièce est dans le domaine élastique σ_{maxi} évolue linéairement par rapport à σ_{local}. Il n'est donc pas nécessaire de réaliser un abaque mais d'identifier le rapport $\frac{\sigma_{maxi}}{\sigma_{local}}$ qui reste constant sur le domaine élastique. Pour le cas d'illustration, pour un placement à x = 10 mm, $\frac{\sigma_{maxi}}{\sigma_{local}}$ vaut : 2,1644.

Pour les scénarios 2 et 4, du fait de l'utilisation de la pièce en partie dans son domaine plastique, des non-linéarités apparaissent. Ainsi, il est nécessaire de calculer des abaques en utilisant un modèle éléments finis.

Dans le cadre du modèle d'illustration, la Figure 157 présente ces abaques pour tous les scénarios. La contrainte locale $\sigma_{mémoire}$ à partir de laquelle le témoin se plastifie et commence à mesurer pour les scénarios 3 et 4 est représentée par une barre verte.

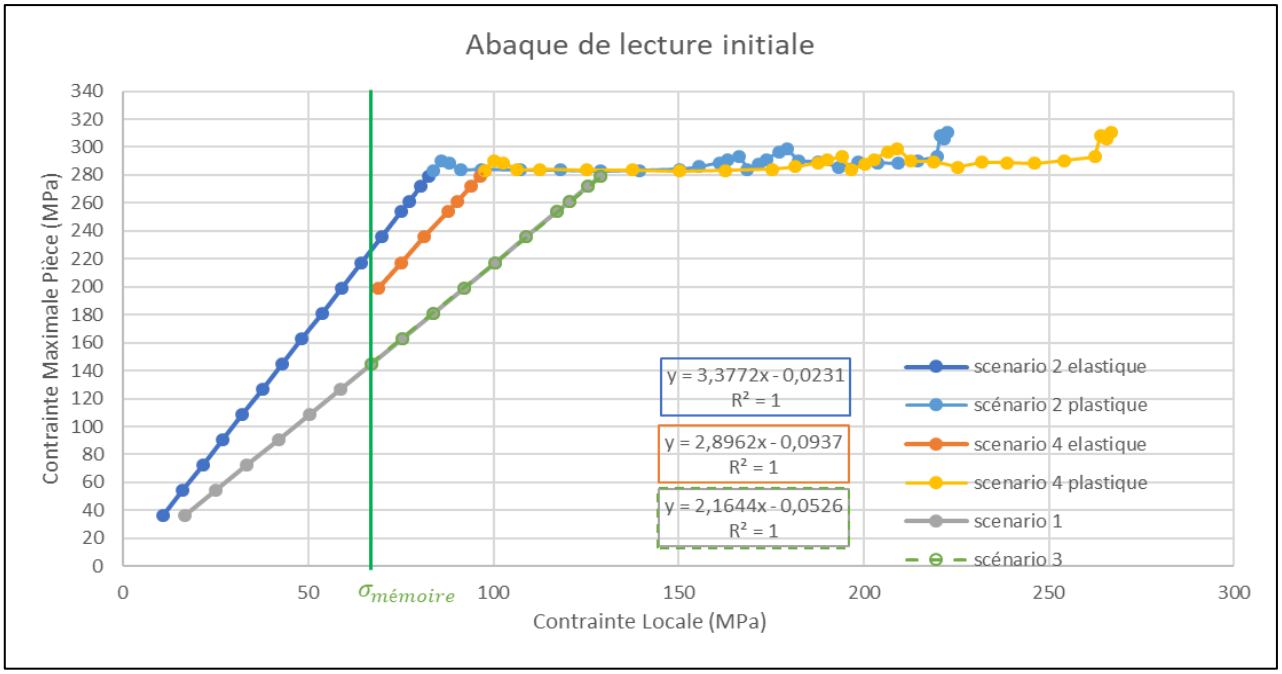


Figure 157: Abaque de lecture de la contrainte maximale à partir de la contrainte locale pour tous les scénarios

Il est ainsi possible de déterminer la contrainte maximale dans la pièce en temps réel et en différé en connaissant la contrainte locale là où doit être placé le témoin.

V.3.4. Validation de la méthode proposée

La méthode proposée ne nécessite pas de simulation de la pièce avec le témoin enfoui. Afin d'évaluer la précision de la méthode proposée, une simulation éléments finis de la poutre avec le témoin enfoui aux emplacements spécifiés pour chaque scénario est réalisée. L'enjeu est de relever divers écarts entre les résultats donnés par la méthode proposée avec les abaques et ceux données par la simulation ayant le témoin enfoui.

Les modèles de ces poutres ayant le témoin enfoui dites « de contrôle » sont décrits Figure 158, Figure 159 et Figure 160. Les caractéristiques de leur maillage sont détaillées Tableau 35, Figure 161 et Figure 162. Les conditions aux limites de ces poutres restent les mêmes que celles présentées Figure 149.

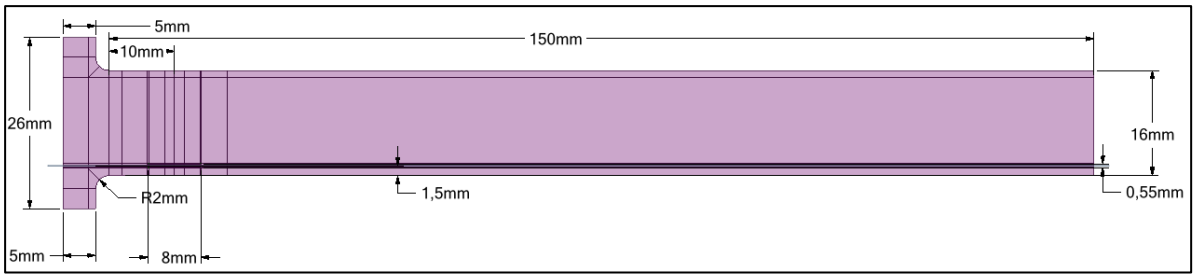


Figure 158: Dimensions de la poutre avec le témoin encastré à 10 mm pour les scénario 1 et 3

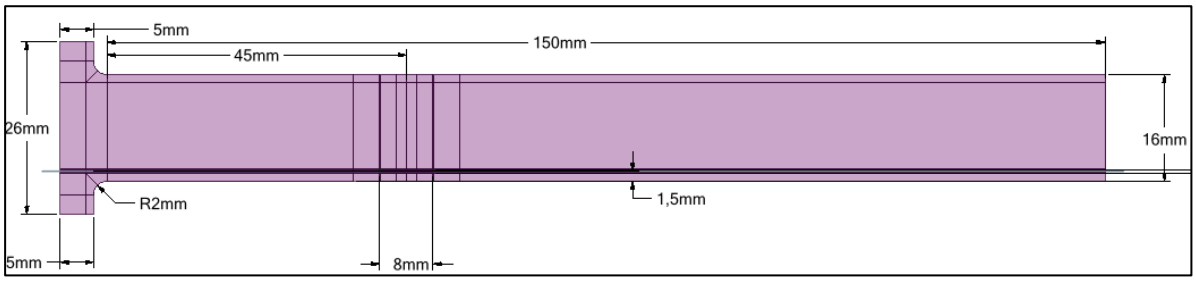


Figure 159: Dimensions de la poutre avec le témoin encastré à 45 mm pour le scénario 4

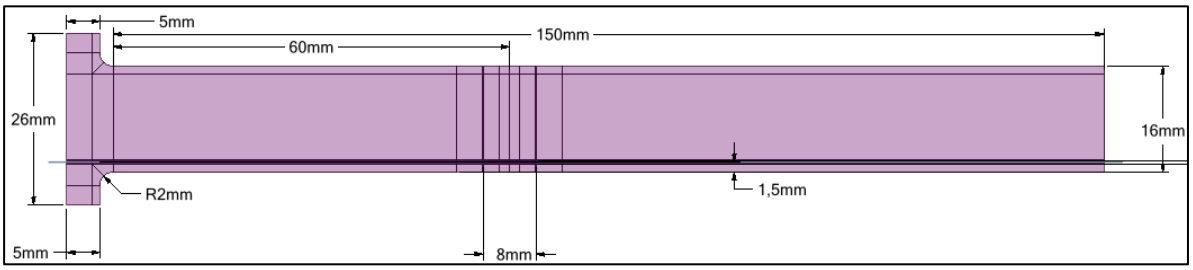


Figure 160: Dimensions de la poutre avec le témoin encastré à 60 mm pour le scénario 2

Tableau 35: Détail du maillage de la poutre

Scénario	**1 et 3 (10 mm)**	**4 (45 mm)**	**2 (60 mm)**
Ordre du Maillage	linéaire		
Type de Maillage	hexaédrique		
Nombre d'éléments	72252	81816	109480
Taille d'arrête du plus petit élément	0,01mm		
Grands déplacements	activé		

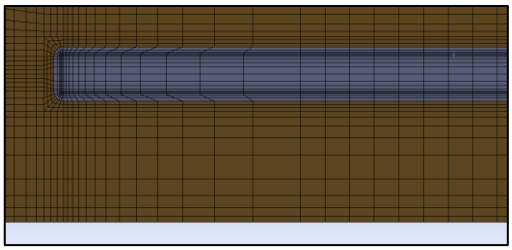


Figure 161: Zoom sur le maillage de la tranche du témoin

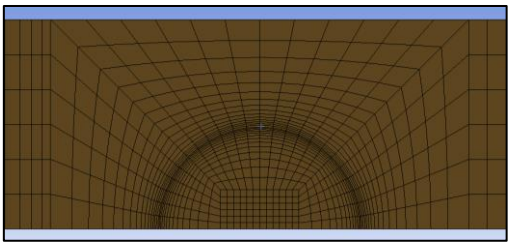


Figure 162: Zoom sur le maillage de la face supérieure de la poutre au niveau du témoin

V.3.4.1. Influence du maillage local sur la contrainte maximale

La variation de contrainte maximale due à la différence de maillage entre le modèle initial (maillé globalement) et les modèles avec maillage local du potentiel témoin peut être identifiée. Pour cela, la variation de la contrainte maximale sur les modèles entièrement en aluminium mais avec des maillages différents est calculée.

Lorsque la contrainte maximale est dans le domaine élastique, l'influence du maillage sur la contrainte maximale est faible. L'écart entre les modèles de contrôle et le modèle initial est inférieur à 0,8 % sur tout le domaine élastique pour tous les scénarios.

L'écart dû au maillage entre le modèle initial et les modèles de contrôle est plus important sur le domaine plastique. La variation de contrainte maximale entre ces modèles est représentée Figure 163. (Les courbes se suivent correctement et l'écart maximal sur le domaine plastique est de 6 %)

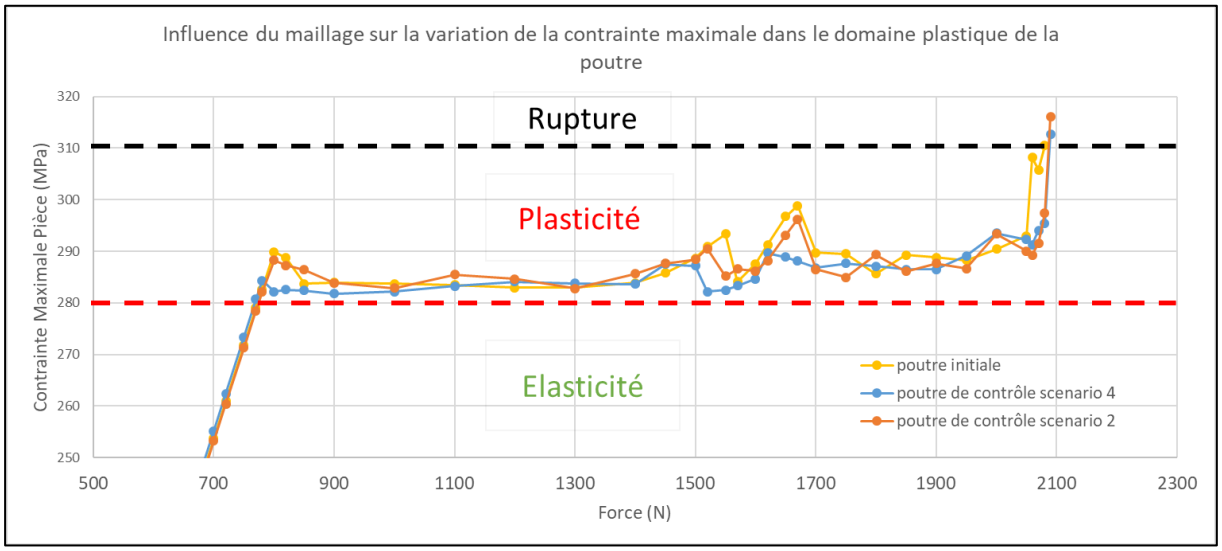


Figure 163 : Influence du maillage entre la poutre initiale et les poutres de contrôle sur la variation de la contrainte maximale dans le domaine plastique

La même étude peut être réalisée pour l'influence du maillage sur la contrainte locale cette fois-ci aux deux points de placements du témoin. Les écarts représentent moins de 0,05 % pour le modèle de contrôle du domaine élastique pour les scénarios 1 et 3, moins de 0,25 % pour le scénario 4 et moins de 0,1 % pour le scénario 2 dans le domaine plastique et élastique.

V.3.4.2. Influence de la présence du témoin sur la contrainte maximale

La variation de contrainte maximale lorsque le témoin est présent par rapport à lorsqu'il est absent pour chaque scénario quantifie l'impact de sa présence sur la contrainte maximale dans la poutre.

L'enjeu est que l'insertion du témoin ne fragilise pas la poutre et n'ai donc pas de conséquence sur la localisation de la contrainte maximale. Pour vérifier cela, la variation de la contrainte maximale sur les poutres de contrôle sans témoin pour divers chargements est calculée. Pour réaliser cela, les éléments représentant le témoin sur les poutres de contrôle sont affectés avec le matériau de la poutre. Cette variation de contrainte maximale est comparée à celle obtenue sur les modèles de contrôle lorsque les éléments sont affectés avec le matériau du témoin pour le scénario souhaité. Ainsi l'influence de la présence du témoin, et non du maillage, est calculée.

Sa présence ne fragilise pas la poutre, en effet la contrainte maximale ne varie que très peu. Pour les scénarios 1 et 3, la variation est inférieure à 0,2 %. Pour les scénarios 2 et 4 se concentrant sur le domaine plastique de la pièce, la présence du témoin reste très faible comme cela peut être remarqué par la superposition des courbes avec et sans témoin Figure 164.

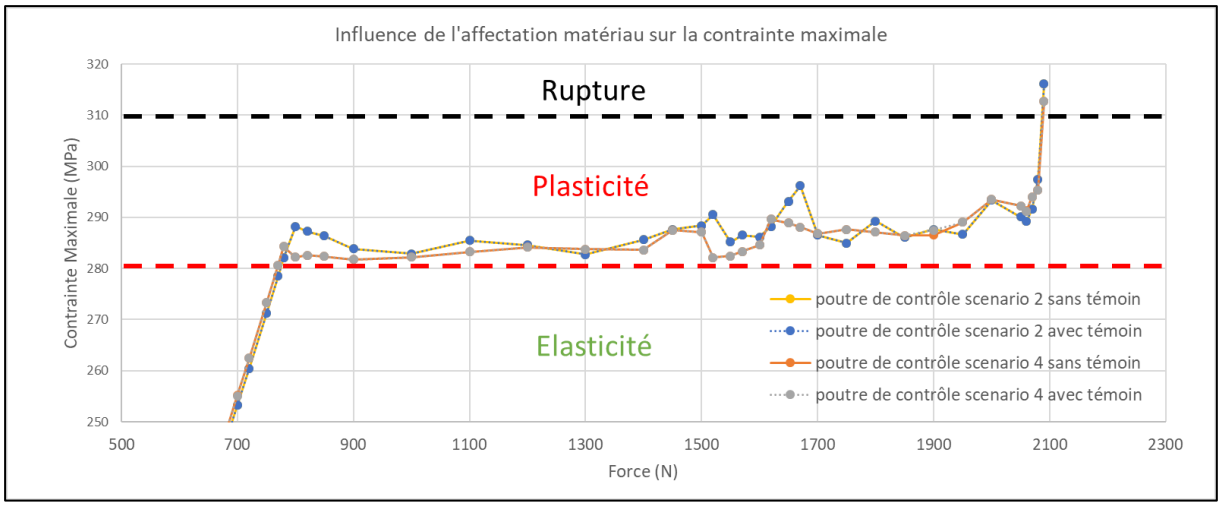


Figure 164: Influence de l'affectation du matériau au éléments du témoin dans le modèle de contrôle sur la variation de la contrainte maximale sur le domaine plastique

La présence du témoin ne fragilise donc pas la pièce hôte et l'écart sur la contrainte maximale entre les deux modèles est principalement dû à la différence de maillage.

V.3.4.3. Influence de la géométrie de la pièce et de son chargement sur le couplage mécanique

Le couplage mécanique a été caractérisé sur une éprouvette en traction. Afin d'évaluer l'écart avec le cas réel d'usage (géométrie de la pièce et son chargement), les pentes alpha et beta peuvent être calculées sur les modèles intégrant le témoin en traçant la contrainte moyenne par rapport à la contrainte moyenne lorsque ceux-ci sont affectés avec le matériau de la pièce hôte.

Le modèle choisi section V.2.2.5 a une pente α de 0,4851 et β_2 de 46,937. Les modèles de contrôle ont des pentes α entre 0,47 et 0,472 et β_2 44,643 et 47,2 en fonction des scénarios.

Le témoin est donc un peu plus contraint en réalité que prévu par l'abaque de couplage mécanique choisi sur le domaine élastique. Cela veut également dire que le témoin se plastifie et commence donc à mesurer pour les scénarios 3 et 4 pour un chargement inférieur à celui initialement pensé.

La contrainte moyenne dans le témoin est également comparée à celle prévue par la méthode. L'erreur sur cette contrainte pour divers chargements montre la précision de l'abaque utilisée. Elle est inférieure à 4 % pour le scénario 1 et 2 et à 4 % pour le scénario 3 et 4. Pour le scénario 3 et 4 lorsque la contrainte rémanente est regardée, l'erreur est plus importante et est de l'ordre de 10 %.

Ainsi l'erreur sur le couplage mécanique semble être la plus importante, cependant le couplage réalisé permet de réaliser un positionnement du témoin. De plus amples travaux sur les abaques de couplage mécanique et leur domaine d'utilisation pourront permettre de réduire l'erreur à la lecture.

V.3.4.4. Validité de la méthode proposée

Afin de valider la méthode proposée, pour chaque scénario, la contrainte maximale du modèle sans témoin est représentée en fonction de la contrainte témoin prédite par la méthode et est comparée à celle relevée sur le modèle correspondant ayant le témoin enfoui. Ces courbes sont représentées pour les scénarios 2 et 3, Figure 165 et Figure 166 ci-dessous. Pour le reste des scénarios, les courbes peuvent être consultées en Annexes. Ces différentes courbes permettent de calculer l'écart maximal entre la méthode proposée et les modèles éléments finis ayant le témoin enfoui. L'écart maximal relevé est inférieur à 7 %. Ainsi, les différentes études menées montrent que la précision de la méthode proposée est suffisante. Cette méthode permet de déterminer avec précision la contrainte

maximale et la contrainte témoin dans une pièce, à partir d'une modélisation éléments finis simple de celle-ci, ne nécessitant pas de représenter le témoin enfoui.

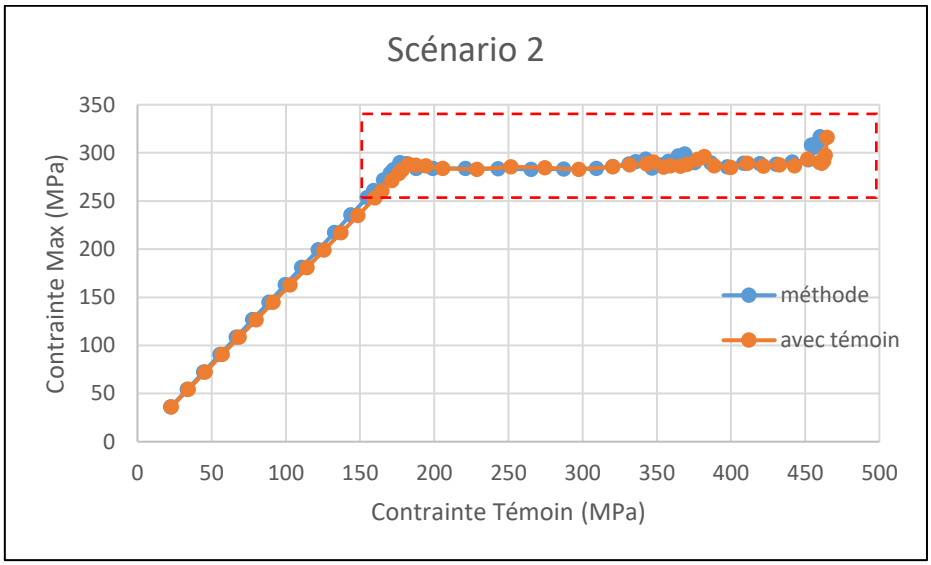


Figure 165 : Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 2, (zoom sur la zone plastique Figure 176 en annexe)

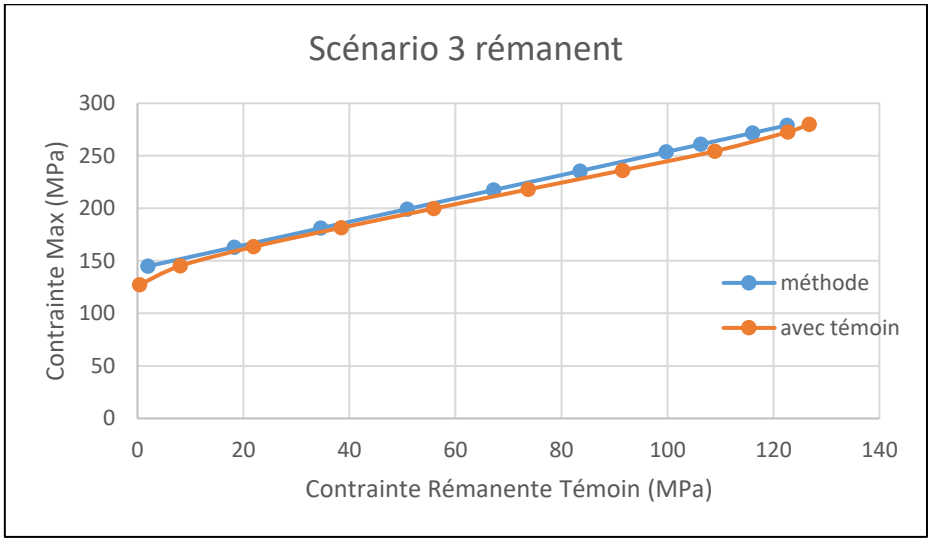


Figure 166 : Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 3

V.3.5. Conclusion sur la méthode de placement

Une méthode a été proposée pour positionner un témoin de déformation dans une pièce afin de contrôler la contrainte maximale dans celle-ci en s'appuyant sur quatre scénarios de mesure différents.

Cette méthode permet de placer le témoin dans une pièce et de relier la contrainte dans celui-ci à la contrainte maximale dans la pièce sans avoir à simuler par éléments finis la pièce intelligente avec le témoin enfoui qui peut s'avérer complexe et demander de fortes ressources de calcul.

Cette méthode s'appuie sur une modélisation éléments finis qui ne représente pas la couche intermétallique. Celle-ci peut être une cause de rupture prématurée dans les pièces aluminium-acier. Du fait de la faible épaisseur de celle-ci (10 µm), la couche intermétallique ne peut être correctement représentée dans le modèle éléments finis d'une pièce intelligente. Son comportement devrait être

simulé de manière isolée et pris en compte dans le calcul du couplage de contrainte entre pièce et témoin. Ainsi le témoin pourrait être positionné dans la pièce afin de respecter également le critère de non-rupture de la couche intermétallique.

La méthode a été établie pour un champ de contrainte uniforme (en traction). Un critère de validité de ce modèle devra être défini pour des champs non uniforme.

De plus, un abaque de couplage mécanique est valable pour n'importe quelle géométrie de pièce et scénarios utilisant le couple matériau représenté par cet abaque. Seule la simulation de la pièce à la limite d'utilisation du scénario et la création de l'abaque de lecture (σ_{maxi} en fonction de σ_{local}) est à refaire.

Il est présenté dans la section suivante un cas d'étude sur lequel est appliquée la méthode développée.

V.4. Cas d'étude

V.4.1. Présentation du cas d'étude et de ces enjeux

La pièce réalisée est un crochet de levage pour pièces légères ayant la forme d'une équerre. Elle porte des pièces en cabine de peinture à projection de poudre à l'aide de manilles. Il est nécessaire de savoir si elle a porté des pièces trop lourdes qui l'ont emmenée proche de la plastification. Le scénario 3 est donc envisagé pour mesurer la contrainte dans le domaine élastique.

Cette pièce est réalisée en WAAM de la manière décrite par les Figure 167 et Figure 168.

Le crochet, dont les dimensions sont décrites Figure 170, est réalisé à plat, la direction d'empilement des couches correspond à l'épaisseur du crochet. Le processus de fabrication du crochet est stoppé lorsqu'au moins 16 mm sur les 40 mm d'épaisseur sont réalisés. Le crochet est ensuite surfacé à 16 mm. Le témoin, une pastille de 8 mm de diamètre est plaquée à une masselotte, il doit être à 1,5 mm sous la surface. La masselotte peut être conçue de manière à faciliter le bridage du témoin sur celle-ci (aspiration, aimant). La construction du crochet est reprise, la soudure en contact avec le témoin pour réaliser le côté épais du crochet, c'est-à-dire 98,5 mm dans la direction (–x) sur la Figure 167. Une fois le côté épais réalisé, la masselotte est retirée. Le crochet est fini en recouvrant le témoin sous un cordon d'épaisseur. Les surfaces fonctionnelles sont usinées ainsi que la surface au droit du témoin afin que le témoin se situe à 1,5 mm de la surface. Le crochet est enfin détaché du substrat par usinage. Le crochet est réalisé avec un fil en alliage d'aluminium 4000 présenté Tableau 31 à la section V.2.2.

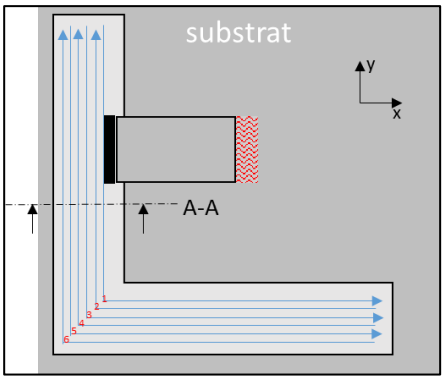


Figure 167 : Ordre et sens de parcours de la torche pour la réalisation du crochet en vue de dessus avec masselotte au contact du témoin en noir

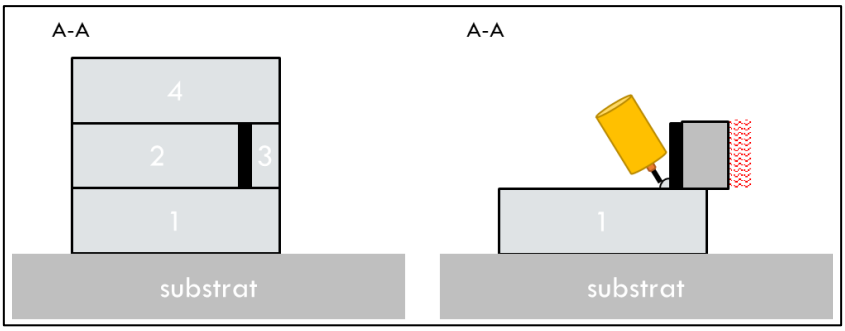


Figure 168 : vue suivant la Coupe AA (Figure 167) de l'ordre des étapes de réalisation du crochet par rapport au témoin en noir (gauche) et vue en cours de réalisation avec la masselotte au contact du témoin (droite)

Les deux plans de symétries du crochet (yz) et (xy) sont utilisés pour utiliser un modèle ne représentant qu'un quart du crochet pour la simulation. Les conditions aux limites sont détaillées sur le quart de crochet Figure 169. Les dimensions sont représentées Figure 170 sur le crochet complet par soucis de clarté. Le maillage est détaillé Tableau 36 et Figure 171. La zone de placement est positionnée à 1,5 mm sous la surface en traction du crochet.

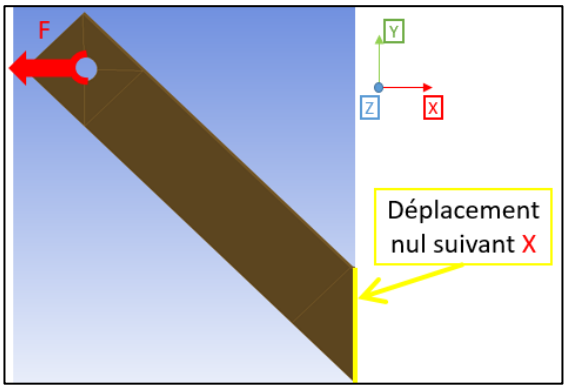


Figure 169: Conditions aux limites du modèle

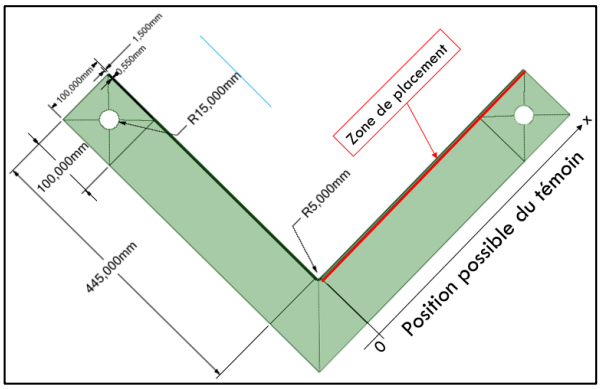


Figure 170 : Dimensions du crochet d'épaisseur 40 mm

Tableau 36: Détail du maillage

Ordre du maillage	linéaire
Type de maillage	hexaédrique
Nombre d'éléments	411120
Taille d'arrête du plus petit élément	0,08 mm
Grands déplacements	activé

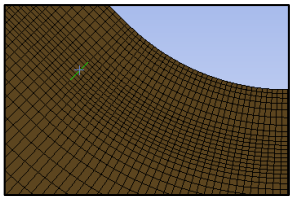


Figure 171 : Zoom sur le maillage au niveau du congé du crochet (arrête surlignée = 0,55 mm)

V.4.2. Application de la méthode

V.4.2.1. Choix du scénario

Le scénario de mesure de la pièce est le scénario 3, c'est-à-dire une mesure en différé de la contrainte maximale du crochet dans son domaine élastique.

V.4.2.2. Choix du matériau du témoin

Le crochet est réalisé avec l'alliage d'aluminium dont les caractéristiques sont décrites Tableau 31. Pour le scénario 3 un acier à faible limite d'élasticité est choisi comme matériau pour le témoin conformément aux préconisations présentées Tableau 33. Les caractéristiques mécaniques de cet acier sont décrites Tableau 31.

V.4.2.3. Simulation à la limite d'utilisation

Le crochet est amené à sa limite d'élasticité Figure 172. La répartition de la contrainte dans la zone de placement est représentée Figure 173.

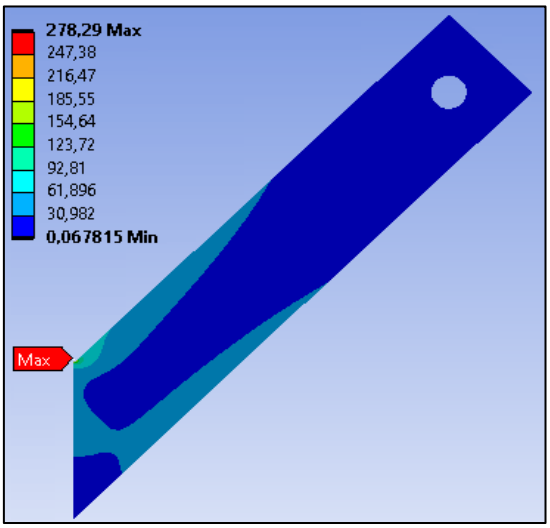


Figure 172: Répartition de la contrainte dans le crochet pour F=16400N

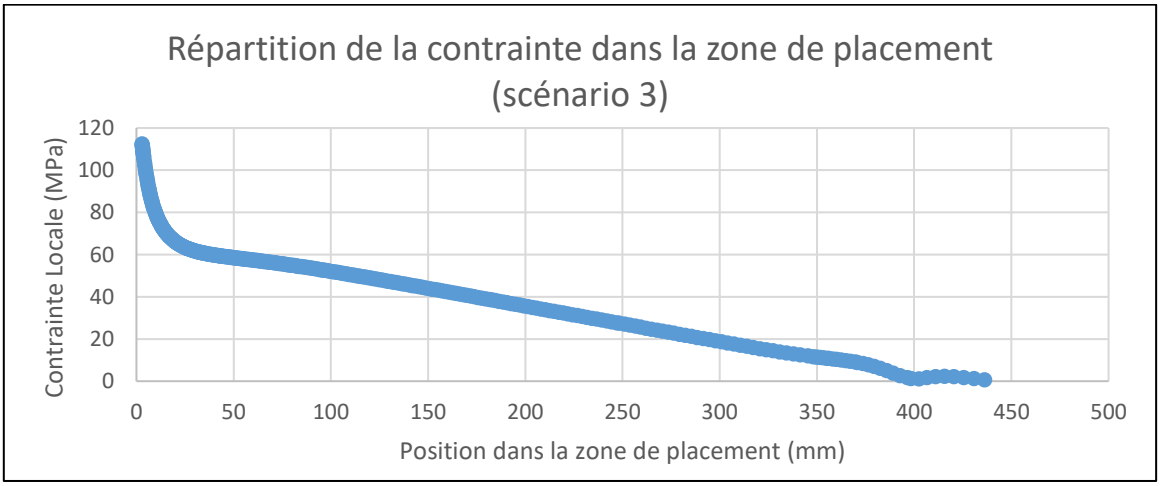


Figure 173 : Répartition de la contrainte dans la zone de placement du crochet de levage

V.4.2.4. Traduction en contrainte témoin

Cette répartition est traduite en contrainte vue par le témoin sur la Figure 174.

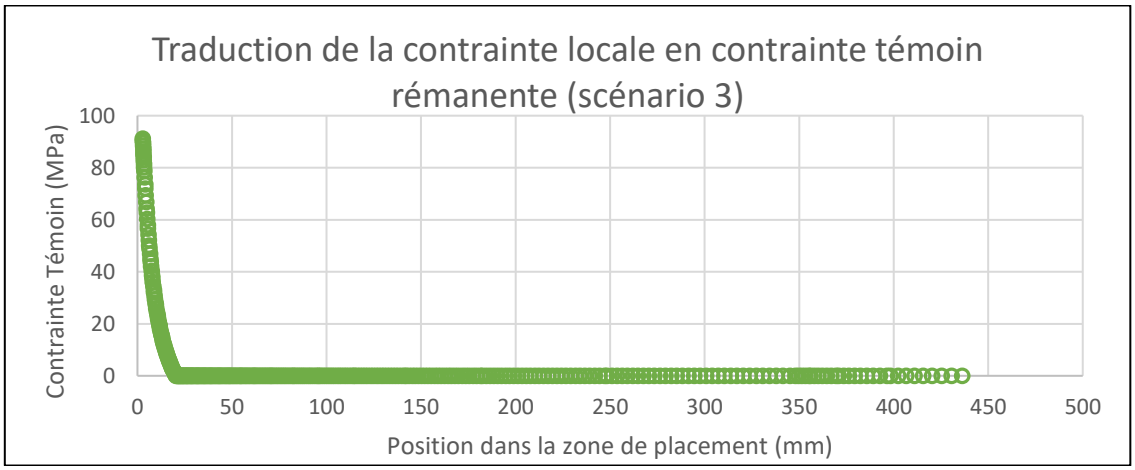


Figure 174 : Traduction de la contrainte dans la zone de placement du crochet de levage pour le scénario 3

V.4.2.5. Choix du placement

Le témoin n'est donc jamais plastifié sur le domaine élastique du crochet au-delà de 25 mm. Il est placé à 5 mm du congé interne du crochet, afin de prendre en compte les spécifications du scénario pour qu'il se plastifie le plus tôt possible et que le témoin de 8 mm ne gêne pas à la réalisation de la trajectoire du congé lors de l'insertion.

V.4.3. Lecture

Pour le scénario 3, le crochet étant complètement dans le domaine élastique le rapport $\sigma_{maxi}/\sigma_{local}$ est constant. Il vaut 2,85.

Le témoin commence à mesurer la contrainte à partir de 180 MPa. Le témoin commence à se plastifier pour une contrainte locale de 63 MPa, donc pour une contrainte maximale de : 63*2,85 = 180 MPa.

Ainsi, il est possible à partir de la contrainte dans le témoin de déterminer la contrainte locale grâce à l'abaque de couplage mécanique et de déterminer la contrainte maximale dans le domaine élastique de la pièce en multipliant la contrainte locale trouvée par 2,85.

V.4.4. Conclusion du cas d'étude

La méthode a ainsi été appliquée sur un cas d'étude : un crochet de levage. La méthode montre qu'avec un placement du témoin à 10 mm ou à 15 mm, la contrainte maximale n'est mesurée qu'à partir de 222 MPa ou 248 MPa. Afin de pouvoir contrôler la contrainte maximale dans la pièce au plus tôt, il faut sélectionner une zone de placement plus contrainte. La méthode proposée semble donc être efficace sur différentes pièces.

Il serait nécessaire d'éprouver la méthode proposée sur une pièce fabriquée par technologie WAAM.

V.5. Discussions

La méthode proposée permet de choisir un emplacement de témoin pour certaines pièces et scénarios. Il n'existe cependant pas nécessairement un placement pour chaque cas possible. Certaines pièces peuvent être réalisées dans un matériau qui ne permet pas la réalisation de certains scénarios. Par exemple, il n'est pas forcément possible de trouver le matériau de témoin ayant une limite d'élasticité suffisamment faible pour plastifier avant la pièce hôte ou suffisamment élevée pour ne jamais plastifier peu importe le chargement de la pièce. En effet, le matériau du témoin doit être disponible sous forme de feuillard d'épaisseur de 0,55 mm.

La géométrie et le chargement de la pièce peut également faire qu'il n'existe pas de localisation dans la pièce dans laquelle la contrainte est suffisamment uniforme pour que les abaques de couplage mécanique réalisés soient utilisables.

Enfin une localisation possible préconisée par la méthode peut être invalide pour l'utilisation correcte de la sonde de mesure. La sonde de mesure a une profondeur d'interrogation maximale et ne peut pas interroger un témoin positionné trop profondément sous la surface.

Il est enfin à noter que la méthode proposée ne prend pas en compte la couche intermétallique dans le couplage mécanique et le choix du placement du témoin. Cette couche peut influencer d'une part sur les pentes (alpha et beta) des abaques de couplage mais également sur la position du témoin dans la zone qui pourrait être repoussée vers des zones moins contraintes. Si la présence de cette couche n'affecte pas les pentes alpha et beta il faut cependant prendre en compte la fragilité de celle-

ci dans le placement du témoin. Pour cela il faut tracer la différence de contrainte normale de part et d'autre des interfaces afin d'évaluer la contrainte de cisaillement essentiellement subie par la couche intermétallique et considérer le placement du témoin pour que celle-ci n'amène pas la couche intermétallique à la rupture.

Cette méthode pourrait être plus simple à appliquer avec une pièce et un témoin ayant des modules de Young plus proche. Cela permettrait notamment de simplifier grandement le couplage mécanique entre le témoin et la pièce hôte et limiterait les concentrations de contraintes.

La méthode proposée pour les scénarios 3 et 4 ne prend pas en compte des chargements qui conduiraient à l'apparition dans la pièce sans témoin de contraintes résiduelles. Ces contraintes viendraient modifier le chargement du témoin lors de la mesure en différé et il est donc important de les caractériser. Ainsi il faudrait soit éviter de placer le témoin dans ces zones, soit bien prendre en compte ces contraintes résiduelles dans la pièce lors de l'étape de traduction.

Enfin le comportement en fatigue d'un témoin inséré devrait être caractérisé afin de s'assurer de la pérennité de la pièce intelligente dans le temps.

V.6. Conclusion et Perspectives

Une méthode de placement d'un témoin de contrôle de la contrainte maximale dans une pièce a été présentée dans cette section. Des préconisations sur le choix de matériau du témoin ont également été formulées.

Cette méthode est construite sur plusieurs étapes :

- Le comportement magnétostrictif du témoin enfoui
- Le couplage mécanique entre la pièce et le témoin enfoui
- La répartition de la contrainte dans la pièce à rendre intelligente

Cette méthode a été mise au point sur quatre scénarios de mesures identifiés :

- La mesure en temps réel de la contrainte maximale dans le domaine élastique
- La mesure en temps réel de la contrainte maximale dans le domaine élastique et plastique
- La mesure en différé de la contrainte maximale dans le domaine élastique
- La mesure en différé de la contrainte maximale dans le domaine élastique et plastique

Pour chaque scénario un seuil est calculé, et des préconisations vis-à-vis des caractéristiques mécaniques du témoin par rapport à ce seuil sont formulées.

Afin d'identifier chaque comportement, la méthode proposée utilise des simulations éléments finis mais pourrait se construire également sur des résultats d'expériences. Elle permet de placer le témoin dans une pièce sans avoir à simuler par éléments finis la pièce avec le témoin inséré qui peut s'avérer une tâche complexe et couteuse en ressources de calcul.

Cette méthode a été présentée et expliquée pour les quatre scénarios proposés sur un cas de poutre encastrée libre en flexion. Elle a été validée sur un exemple de pièce concrète correspondant à un crochet de levage pour pièce légère devant être peintes par projection de poudre. La méthode proposée peut s'appliquer pour surveiller l'évolution d'autres grandeurs que la contrainte maximale, comme la déformation maximale ou le chargement. Pour cela, il faut simplement que la contrainte locale, là où est placé le témoin évolue de manière monotone.

Afin d'améliorer cette méthode de nombreuses pistes peuvent être envisagées :

Des abaques représentant des environnements ayant des chargements plus complexes devraient être réalisés pour avoir plus de liberté dans le placement du témoin dans une pièce. De plus, des critères de validité de ces abaques devraient être mis au point afin qu'ils ne soient pas utilisés dans des environnements ne répondant pas à ces critères. Il serait intéressant de calculer pour chaque nœud de la pièce étudiée un score évaluant la capacité de cet emplacement à répondre à divers critères de placement ou de validité d'un abaque.

Une étude supplémentaire pourrait être réalisée afin de prendre en compte l'influence de la couche intermétallique sur la transmission de contrainte entre le témoin et la pièce. Afin que la couche intermétallique influence moins le transfert de contrainte, il est également possible de repenser l'insertion en perçant le témoin en deux points pour le riveter et promouvoir le transfert de contrainte par traction/compression via ces perçages plutôt que par cisaillement par adhésion via la couche intermétallique.

Le placement du témoin est proposé pour des mesures de contraintes maximales allant jusqu'à la limite d'élasticité ou la limite à la rupture de la pièce. D'autres niveaux peuvent être envisagés et le critère de placement peut être différent. Par exemple, pour une mesure en différé, il peut être intéressant de placer le témoin en fonction de la plage de mesure à contrôler qui n'est pas forcément bornée par une limite d'élasticité ou une limite à la rupture. L'enjeu alors est de connaître la plage mesurable de la grandeur contrôlée en fonction de la position du témoin.

En outre, la méthode n'a été présentée que sur une pièce qui ne comporte qu'un seul cas de charge. Pour évaluer l'état de contrainte d'une pièce présentant plusieurs cas de charge différents, le positionnement du témoin semble plus complexe. Une méthode simple pour répondre à cette difficulté est d'insérer un témoin dans la pièce pour chaque cas de charge à contrôler.

Des études futures devront valider la capacité de cette méthode à placer un témoin permettant de contrôler la contrainte maximale dans une pièce réelle, fabriquée par technologie WAAM, lui conférant ainsi les facultés d'une pièce intelligente.

Conclusions de la thèse

Dans ce manuscrit est traitée la problématique suivante : Comment fabriquer et concevoir une pièce métallique intelligente par fabrication additive WAAM ?

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet FAIR financé par la région Auvergne-Rhône-Alpes qui a pour but d'évaluer la capacité de la technologie WAAM à produire des pièces métalliques intelligentes pour l'industrie.

Une pièce intelligente est définie comme une pièce comportant un dispositif (capteur ou actionneur) inséré au cours du procédé de fabrication de la pièce. Le périmètre de recherche est limité aux capteurs de contraintes et aux pièces en aluminium. Afin de pouvoir réaliser une pièce intelligente avec la technologie WAAM, il est nécessaire de pouvoir recouvrir avec le procédé WAAM un dispositif dont la taille est plus grande que la largeur d'un cordon. Le dispositif nécessite donc d'être enfoui dans des zones massives.

Le premier verrou scientifique préalable à la réalisation de pièce intelligente en WAAM portait sur la fabrication de pièces massives en aluminium. L'étude bibliographique, section I.1, a permis de sélectionner certains paramètres et de souligner l'influence de la gestion de l'énergie sur la santé matière et la géométrie des cordons lors de la fabrication de pièces massives (Robert et al., 2019, 2018). Le Chapitre II a permis de répondre à la question de recherche suivante : Comment déterminer les paramètres non fixés par la bibliographie pour fabriquer une pièce massive en WAAM de manière efficace ? Des campagnes expérimentales ont ainsi été menées avec le procédé WAAM pour sélectionner ces paramètres (WFS – TS - EP/EN - Température « d'interpass » - Ordre de dépose - Surépaisseurs). A l'aide de ces paramètres, des blocs ont été produits, des éprouvettes en ont été extraites, et leurs caractéristiques mécaniques ont été déterminées par essai sur banc de traction.

Le deuxième verrou scientifique identifié était de choisir correctement la technologie de mesure de contrainte à insérer. De nombreux dispositifs pouvant être insérés au cours du procédé WAAM et méthodes de sélection ont été passés en revue dans la section I.2 du chapitre bibliographique. Le Chapitre III a permis de répondre à la question de recherche suivante : Comment sélectionner un capteur de contrainte à insérer au cours du procédé WAAM en fonction de ses caractéristiques et des spécifications du produit à rendre intelligent ? Une synthèse des technologies de mesure de contrainte pertinentes pour l'insertion au cours du procédé WAAM y est donc présentée et un guide de sélection (Robert et al., 2021) s'appuyant sur la connaissance de ces technologies et sur les spécifications de pièces à rendre intelligente est proposé. Le suivi de témoin de contrainte magnétostrictif enfoui par induction est la technologie sélectionnée grâce à ce guide et développée par le laboratoire partenaire TIMA. La sonde développée a fait l'objet du dépôt d'un brevet (Ricart et al., 2021).

Le verrou scientifique suivant portait sur la fabricabilité d'une pièce intelligente avec la technologie sélectionnée. La section I.3 de la bibliographie a permis de synthétiser les recommandations à suivre pour réaliser l'insertion saine d'un témoin fin en acier dans une pièce massive en aluminium ainsi que les analyses à réaliser pour juger de la qualité de cette insertion. L'objectif du Chapitre IV était de répondre à la question de recherche suivante : Comment insérer sainement un témoin fin en acier dans une pièce massive en aluminium durant sa fabrication par procédé WAAM ? Pour cela diverses expérimentations ont été réalisées afin de trouver une configuration permettant l'insertion saine d'un témoin au cours du procédé WAAM. L'analyse par tomographie à rayons X du témoin a permis de produire par traitement d'image des cartes d'épaisseur

des témoins permettant de juger de leur détérioration. L'analyse par MEB en rétrodiffusion de la couche intermétallique présente entre le témoin et l'aluminium a complété cette étude en montrant la fusion entre le témoin et la pièce hôte. Ainsi, la preuve de la fabricabilité d'une pièce en aluminium reposant sur la technologie sélectionnée, c'est-à-dire avec un témoin fin en acier enfoui, a été apportée.

Enfin, le dernier verrou scientifique identifié était le choix de la localisation du témoin dans la pièce permettant la mesure de la contrainte maximale dans celle-ci. La section I.4 de la bibliographie a permis d'identifier le comportement magnétostrictif des aciers en plasticité et le comportement mécanique des pièces bi-matériaux. Le Chapitre V traite de la question de recherche suivante : Comment choisir et positionner un témoin dans une pièce en fonction du chargement et de la contrainte à mesurer ? Ainsi des préconisations pour la sélection des caractéristiques mécaniques du témoin ont été formulées et une méthode de placement du témoin pour la mesure de la contrainte maximale dans une pièce hôte a été présentée. Celle-ci est basée sur des scénarios de mesures et sur des simulations éléments finis en grands déplacements.

Ainsi, les quatre verrous identifiés ont pu être levés dans ce manuscrit et une réponse a été apportée à la problématique principale : « Comment fabriquer et concevoir une pièce métallique intelligente par fabrication additive WAAM ? ».

Perspectives de la thèse

Les travaux menés sur la réalisation de pièces intelligentes s'inscrivent dans les enjeux de l'industrie 4.0. Ils ont permis de lever certains verrous scientifiques et d'en identifier de nouveaux qui nécessiteraient de plus amples recherches pour être levés afin de permettre l'avènement des pièces intelligentes dans l'industrie.

La maîtrise des conditions de réalisation des pièces massives est un préalable à la réalisation de pièces intelligentes par insertion. De nombreux travaux doivent encore être menés afin de parfaire les connaissances du rôle que jouent certains paramètres sur la qualité géométrique et sur la santé matière des pièces réalisées.

De nombreuses technologies ont été recensées pour être insérées au cours du procédé WAAM. Certaines présentent un TRL relativement faible et mériterait d'être investigués plus profondément. Par exemple, le principe d'utiliser un témoin enfoui en tant que marqueur dans la pièce est un principe qui peut être utilisée avec de nombreuses technologies de sondes et pour mesurer diverses grandeurs. Dans cette thèse, la mesure par induction de la contrainte subie par un témoin magnétostrictif a été investiguée mais elle pourrait être réalisée par technologie ultrason ou rayons x par exemple, et le témoin pourrait permettre de mesurer d'autres grandeurs tel que la température. L'enjeu est que la technologie de sonde utilisée puisse repérer le témoin enfoui et mesurer la grandeur dont il doit être le marqueur.

Dans ce manuscrit, la technologie utilisée permet de repérer un témoin magnétostrictif dans une pièce amagnétique. Pour cela un témoin en acier galvanisé de faible épaisseur est inséré dans une pièce massive en aluminium. Une configuration permettant l'insertion du témoin dans une pièce en aluminium a été proposée.

Pour optimiser l'insertion, d'autres paramètres pourraient également être investigués comme le revêtement du témoin, le bridage de celui-ci sur la masselotte, ou d'autres paramètres de soudures ou de trajectoires.

La réalisation d'une éprouvette de traction avec un témoin inséré permettrait d'évaluer sous charge la qualité de l'insertion réalisée et d'évaluer l'impact de cette insertion par rapport à une éprouvette de traction sans insert.

Cette technologie pourrait être utilisée pour des pièces hôtes réalisées avec des matériaux différents. Par exemple, un témoin en acier inoxydable ferromagnétique pourrait servir de témoin et être inséré dans une pièce réalisée en acier inoxydable amagnétique.

Il serait également possible de réaliser le témoin enfoui par soudure avec un autre matériau ou simplement en changeant les paramètres de fabrication. La pièce aurait alors une zone dont la structure matériau serait localement différente et qui servirait ainsi de témoin de contrainte ou de marquage. Des marquages sur l'exemple du code-barres pourraient ainsi être réalisés afin de permettre un traçage protégé des pièces réalisées.

La méthode proposée repose sur la réalisation d'abaques de couplage entre le témoin et son environnement. Une bibliothèque d'abaques permettant de couvrir différentes conditions d'insertions, différents matériaux de témoins et de pièces ainsi que différentes géométries de témoins pourrait être réalisée afin de pouvoir appliquer la méthode proposée dans une plus grande diversité de cas d'usages.

Enfin, pour poursuivre les travaux menés au cours de cette thèse, le placement et l'insertion complète d'un témoin dans une pièce réalisée par WAAM permettrait de valider par l'expérience la méthode proposée ainsi que la configuration préconisée pour l'insertion.

Annexes

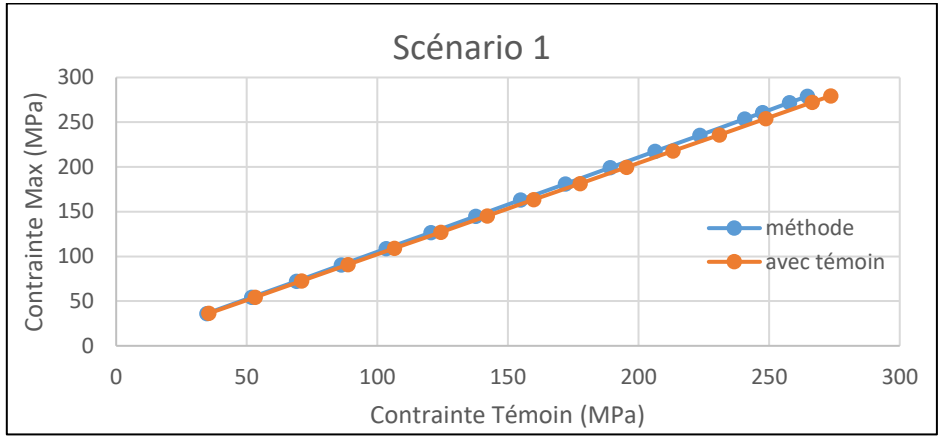


Figure 175: Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 1

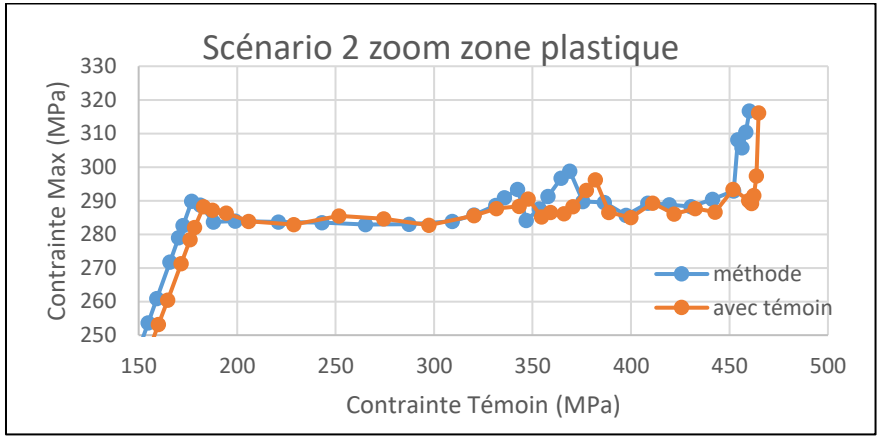


Figure 176 : Zoom sur la zone plastique de la Figure 165

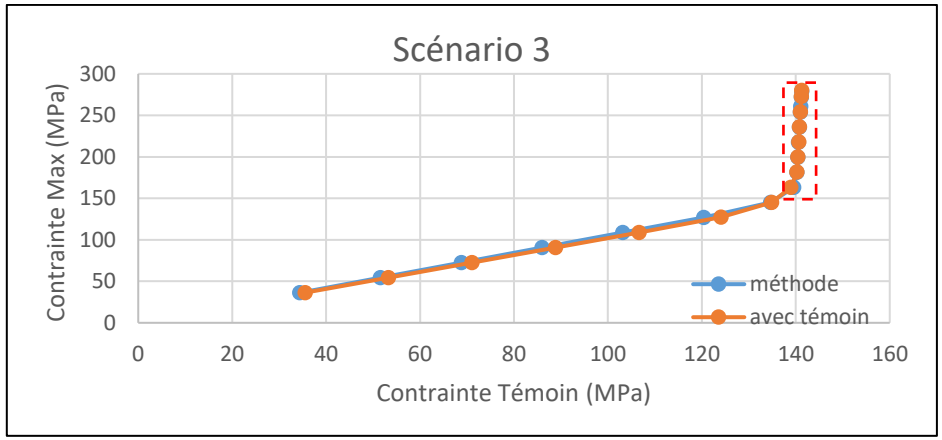


Figure 177: Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 3

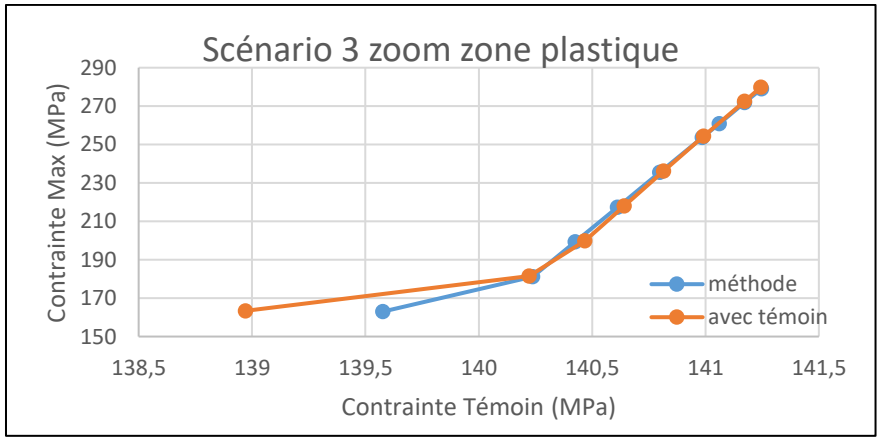


Figure 178 : zoom sur la zone plastique du témoin sur la Figure 177

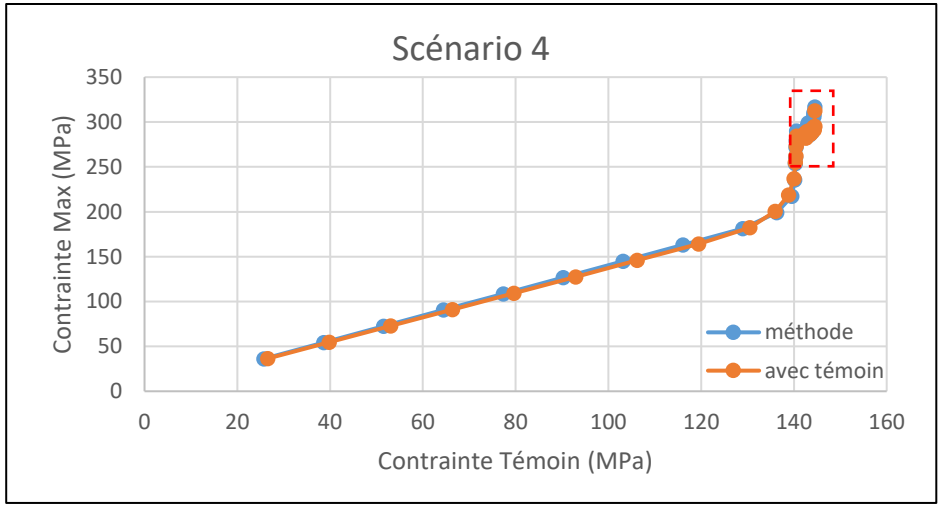


Figure 179: Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 4

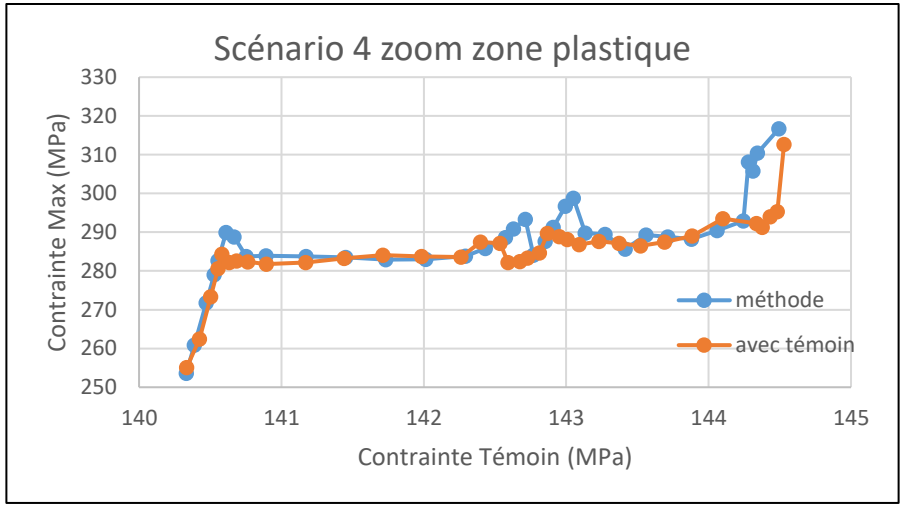


Figure 180 : Zoom sur la zone plastique Figure 179

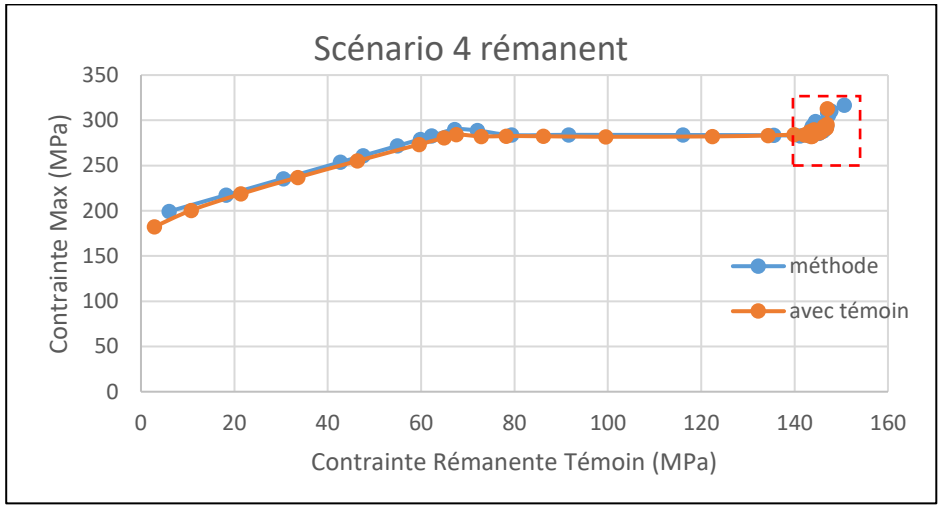


Figure 181 : Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin rémanente déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 4

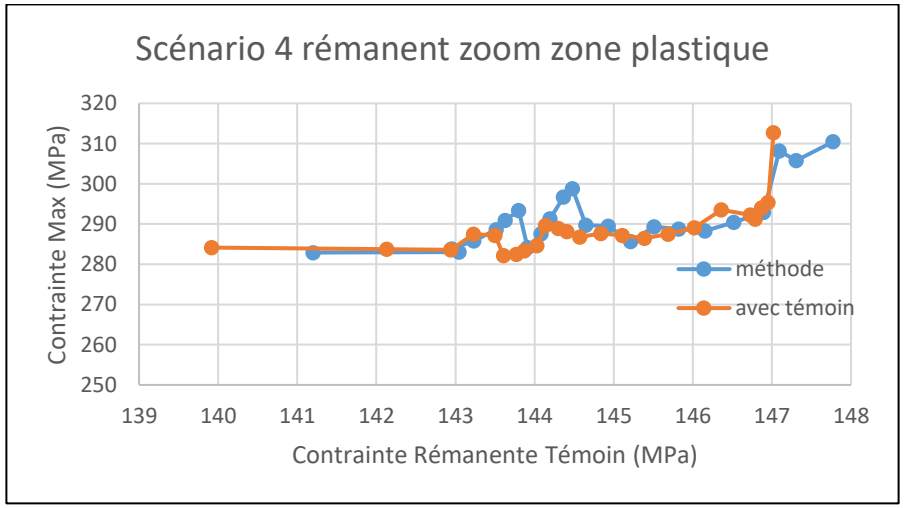


Figure 182 : zoom sur la zone plastique du témoin Figure 181

Références

[1] Adebayo, A., Mehnen, J., Tonnellier, X., 2013. Limiting travel speed in additive layer manufacturing. Presented at the 9th International Conference on Trends in Welding Research, Chicago, Illinois, p. 8.

[2] AFNOR, 2002. Norme NF 1011-2 [WWW Document]. afnor.org. URL https://viewerbdc.afnor.org/pdf/viewer/k5-McK6aXp41 (accessed 4.14.22).

[3] Agudo, L., Eyidi, D., Schmaranzer, C.H., Arenholz, E., Jank, N., Bruckner, J., Pyzalla, A.R., 2007. Intermetallic FexAly-phases in a steel/Al-alloy fusion weld. Journal of Materials Science 42, 4205–4214.

[4] Aiyiti, W., Zhao, W., Lu, B., Tang, Y., 2006. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping. Rapid Prototyping Journal 12, 165–172.

[5] Alemohammad, H., Toyserkani, E., Paul, C.P., 2007. Fabrication of smart cutting tools with embedded optical fiber sensors using combined laser solid freeform fabrication and moulding techniques. Optics and Lasers in Engineering 45, 1010–1017.

[6] Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Iturrioz, A., Alvarez, P., 2021. Strategies to Reduce Porosity in Al-Mg WAAM Parts and Their Impact on Mechanical Properties. Metals 11, 524.

[7] arcelormittal.com, 2021. Catalogue des aciers galvanisés à chaud [WWW Document]. arcelormittal.com. URL https://industry.arcelormittal.com/catalogue/E20/FR#grade_3446 (accessed 5.4.22).

[8] Ayarkwa, K. f., Williams, S., Ding, J., 2015. Investigation of pulse advance cold metal transfer on aluminium wire arc additive manufacturing. International Journal of Rapid Manufacturing 5, 44–57.

[9] Ayarkwa, K.F., Williams, S.W., Ding, J., 2017. Assessing the effect of TIG alternating current time cycle on aluminium wire+arc additive manufacture. Additive Manufacturing 18, 186–193.

[10] Baby, S., Balasubramanian, T., Pardikar, R.J., Palaniappan, M., Subbaratnam, R., 2003. Time-of-flight diffraction (TOFD) technique for accurate sizing of surface-breaking cracks. insight 45, 426–430.

[11] Bacelar, R., 2017. Evaluation of WAAM parts by NDT (Master Thesis). Tecnico Lisbao.

[12] Basak, S., Das, H., Pal, T.K., Shome, M., 2016. Characterization of intermetallics in aluminum to zinc coated interstitial free steel joining by pulsed MIG brazing for automotive application. Materials Characterization 112, 229–237.

[13] Bennour, Y., 2016. Réalisation d'une station de caractérisation de capteurs de pression (Master Thesis). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[14] Bento, J.B., Lopez, A., Pires, I., Quintino, L., Santos, T.G., 2019. Non-destructive testing for wire + arc additive manufacturing of aluminium parts. Additive Manufacturing 29, 100782.

[15] Béraud, N., Chergui, A., Limousin, M., Villeneuve, F., Vignat, F., 2022. An indicator of porosity through simulation of melt pool volume in aluminum wire arc additive manufacturing. Mechanics & Industry 23, 1.

[16] Boehler Voestalpine, 2014. Datasheet Boehler S-Al Si 5 solid wire [WWW Document]. voestalpine.com/welding. URL https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/15112015000000B_Boehler%20S-Al%20Si%205_solid%20wire.pdf (accessed 1.27.21).

[17] Borrisutthekul, R., Yachi, T., Miyashita, Y., Mutoh, Y., 2007. Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy. Materials Science and Engineering: A 467, 108–113.

[18] Bourlet, C., 2019. 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. ENSAM Metz.

[19] Bourlet, C., Scandella, F., Jubin, L., 2017. Etat de l'art de fabrication additive métallique avec du fil. Études et Recherches, Institut de Soudure 53–63.

[20] Campatelli, G., Campanella, D., Barcellona, A., Fratini, L., Grossi, N., Ingarao, G., 2020. Microstructural, mechanical and energy demand characterization of alternative WAAM techniques for Al-alloy parts production. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.

[21] Cao, R., Yu, G., Chen, J.H., Wang, P.-C., 2013. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel. Journal of Materials Processing Technology 10, 1753–1763.

[22] Cao, Y., Zhu, S., Liang, X., Wang, W., 2011. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27, 641–645.

[23] CEMEQ, CSMOFMI, 2010. Soudage et assemblage-soudage: guide d'auto-apprentissage. Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle, Île-des-Soeurs, Québec.

[24] Chabenat, A., 2000. Montage des pièces pour soudage à l'arc électrique. Techniques de l'ingénieur, Mécanique - Travail des matériaux, Assemblage 14.

[25] Chabot, A., Laroche, N., Carcreff, E., Rauch, M., Hascoët, J.-Y., 2020. Towards defect monitoring for metallic additive manufacturing components using phased array ultrasonic testing. Journal of Intelligent Manufacturing 31, 1191–1201.

[26] Chauveau, D., 2018. Review of NDT and process monitoring techniques usable to produce high-quality parts by welding or additive manufacturing. Weld World 62, 1097–1118.

[27] Chauveau, D., Angelini, F., Bemba, A., Ke, W., Roy, O., Landois, D., Benoist, G., 2014. Nouvelles possibilités offertes par la technique FMC/TFM embarqué dans un équipement multiéléments portable pour l'aide à la caractérisation des défauts de soudure, in: Journées COFREND de Bordeaux 2014. Presented at the Journées COFREND, Bordeaux, p. 14.

[28] Cheng, X., Datta, A., Choi, H., Zhang, X., Li, X., 2007. Study on Embedding and Integration of Microsensors Into Metal Structures for Manufacturing Applications. Journal of Manufacturing Science and Engineering 129, 416–424.

[29] Chergui, M.A., 2021. Simulation Based deposition Strategies Evaluation and Optimization in Wire Arc Additive Manufacturing (Phd Thesis). Université Grenoble Alpes.

[30] Choi, H., Datta, A., Cheng, X., Li, X., 2006. Microfabrication and characterization of metal-embedded thin-film thermomechanical microsensors for applications in hostile manufacturing environments. Journal of Microelectromechanical Systems 15, 322–329.

[31] Colegrove, P.A., Coules, H.E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H., Cozzolino, L.D., 2013. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling. Journal of Materials Processing Technology 213, 1782–1791.

[32] Cong, B., Ding, J., Williams, S., 2015. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 76, 1593–1606.

[33] Cong, B., Ouyang, R., Qi, B., Ding, J., 2016. Influence of Cold Metal Transfer Process and Its Heat Input on Weld Bead Geometry and Porosity of Aluminum-Copper Alloy Welds. Rare Metal Materials and Engineering 45, 606–611.

[34] Cong, B., Qi, Z., Qi, B., Sun, H., Zhao, G., Ding, J., 2017. A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. Applied Sciences 7, 275.

[35] Cunningham, C.R., Flynn, J.M., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T., 2018. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. Additive Manufacturing 22, 672–686.

[36] Derekar, K.S., 2018. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. Materials Science and Technology 1–22.

[37] Derekar, K.S., Addison, A., Joshi, S.S., Zhang, X., Lawrence, J., Xu, L., Melton, G., Griffiths, D., 2020. Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107, 311–331.

[38] Derringer, G., Suich, R., 1980. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. Journal of Quality Technology 12, 214–219.

[39] Deryugin, Y.Y., Lasko, G.V., 2012. Field of Stresses in an Isotropic Plane with Circular Inclusion under Tensile Stress. Engineering 04, 583–589.

[40] Devletian, J.H., Wood, W.E., 1983. Factors affecting porosity in aluminum welds- A review. Welding Research Council, Bulletin 1–18.

[41] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., 2015. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 34, 8–19.

[42] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., 2014. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 31, 101–110.

[43] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Duin, S. van, 2016a. Advanced Design for Additive Manufacturing: 3D Slicing and 2D Path Planning. New Trends in 3D Printing.

[44] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Larkin, N., 2016b. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. Journal of Cleaner Production 133, 942–952.

[45] Dumont-Fillon, J., 1996. Contrôle non destructif (CND). Techniques de l'ingénieur, Mesures - Analyses | Contrôle non destructif 52.

[46] ESAB, 2017. Puis-je souder de l'aluminium à de l'acier? [WWW Document]. esab.fr. URL https://www.esab.fr/france-benelux/fr/education/blog/can-i-weld-aluminum-to-steel.cfm (accessed 2.2.22).

[47] Feng, Y., Zhang, H., Li, Y., Rao, C., 2010. Temperature Sensing of Metal-Coated Fiber Bragg Grating. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 15, 511–519.

[48] Ferdinand, P., 2018. Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg - Fabrication et caractéristiques. Techniques de l'ingénieur, Mesures-Analyses | Contrôle non destructif 49.

[49] Festinger, J.-C., 2007. Capteurs à fibres optiques. Présentation. Techniques de l'ingénieur, Mesures - Analyses | Contrôle non destructif.

[50] Fritz, L., 2018. Development of a method for optimizing and concretizing of process steps in additive manufacturing using Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) (Master Thesis). Tampere University of Technology.

[51] FRONIUS France, 2017a. Formation U3 Partie 2 : procédé CMT.

[52] FRONIUS France, 2017b. Formation U3 Partie 1 : procédé MIG/MAG.

[53] FRONIUS France, 2017c. Formation U3 Partie 3 : Paramètres de correction.

[54] FRONIUS France, 2010. Compléments d'informations : CMT Advanced; Explications et influences des paramètres.

[55] Furukawa, K., 2006. New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. Welding International 20, 440–445.

[56] Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., 2017. Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy. Science and Technology of Welding and Joining 22, 472–483.

[57] Gierth, M., Henckell, P., Ali, Y., Scholl, J., Bergmann, J.P., 2020. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW). Materials 13, 2671.

[58] Gorkunov, E.S., Zadvorkin, S.M., Smirnov, S.V., Mitropol'skaya, S.Yu., Vichuzhanin, D.I., 2007. Correlation between the stress-strain state parameters and magnetic characteristics of carbon steels. The Physics of Metals and Metallography 103, 311–316.

[59] Grandal, T., Fraga, S., Castro, G., Vazquez, E., Zomoza, A., 2017. Laser brazing metallic embedding technique for fiber optic sensors, in: 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS). Presented at the 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), pp. 1–4.

[60] Grandal, T., Fraga, S., Vázquez, J.A., Zornoza, A., 2016. Technique for embedding fiber optics in metallic structures for smart material applications, in: EWSHM 2016. Presented at the 8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016), Spain, Bilbao.

[61] Grandal, T., Zornoza, A., Fraga, S., Castro, G., Sun, T., Grattan, K.T.V., 2018. Laser Cladding-Based Metallic Embedding Technique for Fiber Optic Sensors. Journal of Lightwave Technology 36, 1018–1025.

[62] Gu, J.L., Ding, J.L., Cong, B.Q., Bai, J., Gu, H.M., Williams, S.W., Zhai, Y.C., 2014. The Influence of Wire Properties on the Quality and Performance of Wire+Arc Additive Manufactured Aluminium Parts. AMR 1081, 210–214.

[63] Gupta, D.K., 2013. A Review on Wireless Sensor Networks. Network and Complex Systems 3, 18–23.

[64] Han, S., Sung, M., Jang, J., Jeon, S.-Y., Yu, W.-R., 2021. The effects of adhesion on the tensile strength of steel-polymer sandwich composites. Advanced Composite Materials 30, 443–461.

[65] Hartemann, P., 1999. Effets et matériaux magnétostrictifs. Techniques de l'ingénieur, Archives 20.

[66] Haselhuhn, A.S., Buhr, M.W., Wijnen, B., Sanders, P.G., Pearce, J.M., 2016. Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing. Materials Science and Engineering: A 673, 511–523.

[67] Havermann, D., Mathew, J., MacPherson, W.N., Maier, R.R.J., Hand, D.P., 2015. Temperature and Strain Measurements With Fiber Bragg Gratings Embedded in Stainless Steel 316. Journal of Lightwave Technology 33, 2474–2479.

[68] Havermann, D., Mathew, J., MacPherson, W.N., Maier, R.R.J., Hand, D.P., 2014. In-situ measurements with fibre Bragg gratings embedded in stainless steel, in: 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. Presented at the 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, International Society for Optics and Photonics, p. 9157A1.

[69] Hönnige, J.R., Colegrove, P.A., Ganguly, S., Eimer, E., Kabra, S., Williams, S., 2018. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. Additive Manufacturing 22, 775–783.

[70] Hossain, M.S., Gonzalez, J.A., Hernandez, R.M., Shuvo, M.A.I., Mireles, J., Choudhuri, A., Lin, Y., Wicker, R.B., 2016. Fabrication of smart parts using powder bed fusion additive manufacturing technology. Additive Manufacturing 10, 58–66.

[71] Hossain, M.S., Mireles, J., Morton, P., Lin, Y., Terrazas, C.A., Wicker, R.B., 2018. Part re-registration during process interruption of electron beam melting additive manufacturing. Int J Adv Manuf Technol 96, 337–344.

[72] IEEE Standards Board, 1991. IEEE Standard on Magnetostrictive Materials: Piezomagnetic Nomenclature. IEEE Std 319-1990 1-.

[73] Iordache, V.-E., 2003. Suivi de l'état de contraintes, appliquées et internes, des alliages ferromagnétiques doux par mesure de leur propriétés magnétiques.

[74] Jackson, B., 2018. Huisman's 3D printed WAAM hook lifts 80,000 kg load [WWW Document]. 3D Printing Industry. URL https://3dprintingindustry.com/news/huismans-3d-printed-waam-hook-lifts-80000-kg-load-127564/ (accessed 5.19.21).

[75] Jácome, L.A., Weber, S., Leitner, A., Arenholz, E., Bruckner, J., Hackl, H., Pyzalla, A.R., 2009. Influence of Filler Composition on the Microstructure and Mechanical Properties of Steel—Aluminum Joints Produced by Metal Arc Joining. Advanced Engineering Materials 11, 350–358.

[76] Javadi, Y., MacLeod, C.N., Pierce, S.G., Gachagan, A., Kerr, W., Ding, J., Williams, S., Vasilev, M., Su, R., Mineo, C., Dziewierz, J., 2019a. Ultrasonic Phased Array Inspection of Wire + Arc Additive Manufacture Samples Using Conventional and Total Focusing Method Imaging Approaches. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 61, 144–148.

[77] Javadi, Y., MacLeod, C.N., Pierce, S.G., Gachagan, A., Lines, D., Mineo, C., Ding, J., Williams, S., Vasilev, M., Mohseni, E., Su, R., 2019b. Ultrasonic phased array inspection of a Wire + Arc Additive Manufactured (WAAM) sample with intentionally embedded defects. Additive Manufacturing 29, 100806.

[78] JCGM, 2012. Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM).

[79] Jin, P., Wang, Z., Yang, S., Jia, P., 2018. Influence of thickness of zinc coating on CMT welding-brazing with AlSi5 alloy wire. Mater. Res. Express 5, 036504.

[80] Karray, F., Jmal, M.W., Garcia-Ortiz, A., Abid, M., Obeid, A.M., 2018. A comprehensive survey on wireless sensor node hardware platforms. Computer Networks 144, 89–110.

[81] Kashiwaya, K., 1991. Fundamentals of Nondestructive Measurement of Biaxial Stress in Steel Utilizing Magnetoelastic Effect under Low Magnetic Field. Japanese Journal of Applied Physics 30, 2932–2942.

[82] Kataria, A., Rosen, D.W., 2001. Building around inserts: methods for fabricating complex devices in stereolithography. Rapid Prototyping Journal 7, 253–262.

[83] Kim, S.-W., 2017. Characteristics of strain transfer and the reflected spectrum of a metal-coated fiber Bragg grating sensor. Optics and Lasers in Engineering 96, 83–93.

[84] Koli, Y., Yuvaraj, N., Vipin, Aravindan, S., 2020. Investigations on weld bead geometry and microstructure in CMT, MIG pulse synergic and MIG welding of AA6061-T6. Materials Research Express 6, 1265e5.

[85] Kumar, T., Kiran, D.V., Arora, N., Kumar, P.S., 2022. Study of steel-aluminium joining under the influence of current waveforms using advanced CMT process variants. Materials and Manufacturing Processes 0, 1–18.

[86] Le Guen, M., 2002. La boite a moustaches pour sensibiliser a la statistique. Bulletin of Sociological Methodology/Bulletin de Méthodologie Sociologique 73, 43–64.

[87] Legait, P.-A., 2006. Formation and Distribution of Porosity in Al-Si Welds (Master Thesis). Worcester Polytechnic Institute.

[88] Lehmhus, D., Aumund-Kopp, C., Petzoldt, F., Godlinski, D., Haberkorn, A., Zöllmer, V., Busse, M., 2016. Customized Smartness: A Survey on Links between Additive Manufacturing and Sensor Integration. Procedia Technology, 3rd International Conference on System-Integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering 26, 284–301.

[89] Lehoux, N., Vallée, P., 2004. Analyse multicritère. Ecole Polytechnique de Montréal: Montréal.

[90] Li, C., Gu, H., Wang, W., Wang, S., Ren, L., Wang, Z., Ming, Z., Zhai, Y., 2020. Effect of Heat Input on Formability, Microstructure, and Properties of Al–7Si–0.6Mg Alloys Deposited by CMT-WAAM Process. Applied Sciences 10, 70.

[91] Li, H., Zhang, L., Zhang, B., Zhang, Q., 2019. Interfacial fracture behavior of a stainless/carbon steel bimetal plate in a uniaxial tension test. Results in Physics 14, 102470.

[92] Li, X., Golnas, A., Prinz, F.B., 2000. Shape deposition manufacturing of smart metallic structures with embedded sensors, in: Smart Structures and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. Presented at the Smart Structures and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, International Society for Optics and Photonics, pp. 160–172.

[93] Li, Y., Han, Q., Zhang, G., Horváth, I., 2018a. A layers-overlapping strategy for robotic wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead components with homogeneous layers. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 96, 3331–3344.

[94] Li, Y., Sun, Y., Han, Q., Zhang, G., Horváth, I., 2018b. Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts. Journal of Materials Processing Technology 252, 838–848.

[95] Li, Z., Ma, G., Zhao, G., Yang, M., Xiao, W., 2018. Weave Bead Welding Based Wire and Arc Additive Manufacturing Technology, in: Wang, S., Price, M., Lim, M.K., Jin, Y., Luo, Y., Chen, R. (Eds.), Recent Advances in Intelligent Manufacturing. Springer Singapore, Singapore, pp. 408–417.

[96] Lin, J., Ma, N., Lei, Y., Murakawa, H., 2013. Shear strength of CMT brazed lap joints between aluminum and zinc-coated steel. Journal of Materials Processing Technology 213, 1303–1310.

[97] Liu, Z., Zhang, P., Li, S., Wu, D., Yu, Z., 2020. Wire and arc additive manufacturing of 4043 Al alloy using a cold metal transfer method. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 27, 783–791.

[98] longevity-inc.com, 2019. Welding Thick to Thin Parts [WWW Document]. longevity-inc.com. URL https://www.longevity-inc.com/welding-articles/post/welding-thick-to-thin-parts/ (accessed 7.19.21).

[99] Lopez, A., Bacelar, R., Pires, I., Santos, T.G., Sousa, J.P., Quintino, L., 2018. Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing. Additive Manufacturing 21, 298–306.

[100] Luyckx, G., Chiesura, G., Lamberti, A., Voet, E., Vanlanduit, S., Van Paepegem, W., Degrieck, J., 2015. Self sensing concept of a RTM based composite control arm for car suspensions, in: SAMPE Europe 2015. Presented at the SAMPE Europe 2015.

[101] Ma, G., Zhao, G., Li, Z., Yang, M., Xiao, W., 2019. Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 101, 1275–1292.

[102] Neto, L.M.S.C., 2017. Studying the Application of Additive Manufacturing to Large Parts. Instituto Superior Tecnico, Portugal.

[103] mathesongas.com, 2021. Aluminum MIG Welding Alloy 4043 [WWW Document]. mathesongas.com. URL https://store.mathesongas.com/4043-alloy-1-lb-spool-gmaw-mig/ (accessed 1.29.21).

[104] matweb.com, 2016. Overview of materials for 4000 Series Aluminum Alloy [WWW Document]. matweb.com. URL https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a965260f643e47e98c11ae7786bdbf65 (accessed 4.7.22).

[105] Mayer, D., Stoffregen, H.A., Heuss, O., Thiel, J., Abele, E., Melz, T., 2016. Additive manufacturing of active struts for piezoelectric shunt damping. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 27, 743–754.

[106] Mena, S.B., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement 11.

[107] Meyer, G.G., Främling, K., Holmström, J., 2009. Intelligent Products: A survey. Computers in Industry 60, 137–148.

[108] Mezrag, B., Deschaux-Beaume, F., Benachour, M., 2015. Control of mass and heat transfer for steel/aluminium joining using Cold Metal Transfer process. Science and Technology of Welding and Joining 20, 189–198.

[109] Miao, Q., Wu, D., Chai, D., Zhan, Y., Bi, G., Niu, F., Ma, G., 2019. Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing. Materials & Design 108205.

[110] Michel, A., 2017. Pièces mécaniques soudées - Conception des assemblages élémentaires. Techniques de l'ingénieur, Mécanique | Fonctions et composants mécaniques.

[111] Michel, A., 2016. Pièces mécaniques soudées - Soudabilité des matériaux. Techniques de l'ingénieur, Mécanique | Fonctions et composants mécaniques.

[112] Milani, A.M., Paidar, M., Khodabandeh, A., Nategh, S., 2016. Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding–brazing of automotive galvanized steel/5754 aluminum alloy in a lap joint configuration. Int J Adv Manuf Technol 82, 1495–1506.

[113] millerwelds.com, 2019. What Are Stickout, Electrode Extension and Contact-Tip-To-Work Distance? [WWW Document]. millerwelds.com. URL https://www.millerwelds.com/resources/article-library/what-are-stickout-electrode-extension-and-contact-tip-to-work-distance (accessed 8.19.21).

[114] Munier, N., Hontoria, E., 2021. Uses and Limitations of the AHP Method, Management for Professionals. Springer.

[115] Nguyen, T.C., Weckman, D.C., Johnson, D.A., Kerr, H.W., 2005. The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding. Science and Technology of Welding and Joining 10, 447–459.

[116] Nickel, A., Barnett, D., Link, G., Prinz, F., 1999. Residual Stresses in Layered Manufacturing. Presented at the 1999 International Solid Freeform Fabrication Symposium.

[117] Nie, Y., Zhang, P., Wu, X., Li, G., Yan, H., Yu, Z., 2018. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by cold metal transfer. Science and Technology of Welding and Joining 23, 527–535.

[118] Niu, S., Chen, S., Dong, H., Zhao, D., Zhang, X., Guo, X., Wang, G., 2016. Microstructure and Properties of Lap Joint Between Aluminum Alloy and Galvanized Steel by CMT. Journal of Materials Engineering and Performance 25, 1839–1847.

[119] Parmantier, Y., Kratz, F., 2009a. Capteurs - Définitions, principes de détection. Techniques de l'ingénieur, Génie Industriel | Métier : responsable qualité 16.

[120] Parmantier, Y., Kratz, F., 2009b. Capteurs - Principes de constitution. Techniques de l'ingénieur, Génie Industriel | Métier : responsable qualité 20.

[121] Petrat, T., Kersting, R., Graf, B., Rethmeier, M., 2018. Embedding electronics into additive manufactured components using laser metal deposition and selective laser melting. Procedia CIRP, 10th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2018] 74, 168–171.

[122] Pickin, C.G., Williams, S.W., Lunt, M., 2011. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. Journal of Materials Processing Technology 211, 496–502.

[123] Plangger, J., Schabhüttl, P., Vuherer, T., Enzinger, N., 2019. CMT Additive Manufacturing of a High Strength Steel Alloy for Application in Crane Construction. Metals 9, 650.

[124] Pramod, R., Kumar, S.M., Girinath, B., Kannan, A.R., Kumar, N.P., Shanmugam, N.S., 2020. Fabrication, characterisation, and finite element analysis of cold metal transfer–based wire and arc additive–manufactured aluminium alloy 4043 cylinder. Weld World 64, 1905–1919.

[125] Quérard, V., 2019. Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM (PhD Thesis). Ecole Centrale de Nantes.

[126] Rajeev, G.P., Kamaraj, M., Bakshi, S.R., 2014. Al-Si-Mn Alloy Coating on Aluminum Substrate Using Cold Metal Transfer (CMT) Welding Technique. JOM 66, 1061–1067.

[127] Ricart, T., Robert, P., Basrour, S., Beraud, N., Museau, M., Paris, H., 2021. Procédé de détermination d'une déformation d'une zone d'une pièce obtenue par fabrication additive. BNT230869FR00.

[128] Robert, P., Beraud, N., Museau, M., Paris, H., 2021. A guide to select strain sensors to be embedded in smart metal parts built by WAAM. Presented at the Conférence Manufaturing 21, Angers, p. 11.

[129] Robert, P., Museau, M., Paris, H., 2018. Effect of Temperature on the Quality of Welding Beads Deposited with CMT Technology, in: 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Presented at the 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), pp. 680–684.

[130] Robert, P., Museau, M., Paris, H., Van Wesemael, A., Gostiaux, X., 2019. Recouvrement acier par technologie CMT : Réalisation et propriétés mécaniques, in: 16ème Colloque National S.Mart. Presented at the 16ème Colloque National S.mart, Les Karellis, France.

[131] Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G., Oliveira, J.P., 2019. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Materials 12, 1121.

[132] Roy, B., Skalka, J.M., 1987. ELECTRE IS: Aspects méthodologiques et guide d'utilisation. LAMSADE, Unité associée au CNRS no 825, Université de Paris Dauphine.

[133] Ruste, J., 2015a. Microscopie électronique à balayage - Principe et équipement. Techniques de l'ingénieur, Mesures - Analyses | Techniques d'analyse.

[134] Ruste, J., 2015b. Microscopie électronique à balayage - Images, applications et développements. Techniques de l'ingénieur, Mesures - Analyses | Techniques d'analyse.

[135] Ryan, E.M., Sabin, T.J., Watts, J.F., Whiting, M.J., 2018. The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. Journal of Materials Processing Technology 262, 577–584.

[136] Saaty, T.L., 1988. What is the analytic hierarchy process?, in: Mathematical Models for Decision Support. Springer, pp. 109–121.

[137] Saheb, N., Mekid, S., 2015. Fiber-Embedded Metallic Materials: From Sensing towards Nervous Behavior. Materials 8, 7938–7961.

[138] Scotti, F.M., Teixeira, F.R., Silva, L.J. da, de Araújo, D.B., Reis, R.P., Scotti, A., 2020. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. Journal of Manufacturing Processes 57, 23–35.

[139] Shi, Y., Shao, L., Huang, J., Gu, Y., 2013. Effects of Si and Mg elements on the microstructure of aluminum–steel joints produced by pulsed DE-GMA welding–brazing. Materials Science and Technology 29, 1118–1124.

[140] Silva, C.M.A., Bragança, I.M.F., Cabrita, A., Quintino, L., Martins, P. a. F., 2017. Formability of a wire arc deposited aluminium alloy. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 39, 4059–4068.

[141] Singh, J., Arora, K.S., Shukla, D.K., 2019. Dissimilar MIG-CMT weld-brazing of aluminium to steel: A review. Journal of Alloys and Compounds 783, 753–764.

[142] Singh, S., Sharma, S. kumar, Rathod, D.W., 2021. A review on process planning strategies and challenges of WAAM. Materials Today: Proceedings.

[143] Song, X., Pan, Y., Chen, Y., 2015. Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering 137.

[144] soudeurs.com, 2014. Quelle est l'influence de la longueur de fil libre (ou stick-out) en MIG/MAG ? [WWW Document]. soudeurs.com. URL https://www.soudeurs.com/site/quelle-est-l-influence-de-la-longueur-de-fil-libre-ou-stick-out-en-mig-mag-346/ (accessed 1.29.21).

[145] Sousa, J.P., Lopez, A.B., Santos, J., Quintino, L., Santos, D., 2019. Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) inspection of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) components 10.

[146] Stupakov, O., Pal'a, J., Tomáš, I., Bydžovský, J., Novák, V., 2007. Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel. Materials Science and Engineering: A 462, 351–354.

[147] Su, C., Chen, X., 2019. Effect of depositing torch angle on the first layer of wire arc additive manufacture using cold metal transfer (CMT). Industrial Robot 46, 259–266.

[148] Su, C., Chen, X., Gao, C., Wang, Y., 2019. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM. Applied Surface Science 486, 431–440.

[149] Su, C., Chen, X., Konovalov, S., Arvind Singh, R., Jayalakshmi, S., Huang, L., 2021. Effect of Deposition Strategies on the Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufactured Al-5Si Alloys. J. of Materi Eng and Perform 30, 2136–2146.

[150] Suryakumar, S., Karunakaran, K.P., Bernard, A., Chandrasekhar, U., Raghavender, N., Sharma, D., 2011. Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. Computer-Aided Design 43, 331–344.

[151] Swartzendruber, L.J., Hicho, G.E., Harsh Deep Chopra, Leigh, S.D., Adam, G., Tsory, E., 1997. Effect of plastic strain on magnetic and mechanical properties of ultralow carbon sheet steel. Journal of Applied Physics 81, 4263–4265.

[152] Thiery, C., 2015. Tomographie à rayons X. Techniques de l'ingénieur, Mesures - Analyses | Techniques d'analyse.

[153] Töppel, T., Lausch, H., Brand, M., Hensel, E., Arnold, M., Rotsch, C., 2018. Structural Integration of Sensors/Actuators by Laser Beam Melting for Tailored Smart Components. JOM 70, 321–327.

[154] Villumsen, S., Kristiansen, M., 2015. Angular Stability Margins for the Remote Fusion Cutting Process. Physics Procedia 78, 89–98.

[155] Wahsh, L., Azzam, M., Turky, M., Salem, H., Hamdy, F., Mansour, A., ElShater, A., 2018. Parameter Selection for Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. pp. 78–85.

[156] Wang, P., Chen, X., Pan, Q., Madigan, B., Long, J., 2016. Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview. Int J Adv Manuf Technol 87, 3081–3090.

[157] weldersmanual.com, 2021. How To Prevent Welds From Burning Through. Welders Manual. URL https://weldersmanual.com/how-to-prevent-welds-from-burning-through/ (accessed 1.19.22).

[158] Wesling, V., Schram, A., Kessler, M., 2010. Low Heat Joining – Manufacturing and Fatigue Strength of Brazed, Locally Hardened Structures. AMR 137, 347–374.

[159] Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P., 2016. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology 32, 641–647.

[160] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., Norrish, J., 2018. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. Journal of Manufacturing Processes 35, 127–139.

[161] Xiong, J., Lei, Y., Li, R., 2017. Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures. Applied Thermal Engineering 126, 43–52.

[162] Xiong, J., Zhang, G., Gao, H., Wu, L., 2013. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 29, 417–423.

[163] Xu, X., Ding, J., Ganguly, S., Diao, C., Williams, S., 2019. Preliminary Investigation of Building Strategies of Maraging Steel Bulk Material Using Wire + Arc Additive Manufacture. J. of Materi Eng and Perform 28, 594–600.

[164] Yaacoubi, S., Daniel, C., Ke, W., Scandella, F., Dainelli, P., 2014. Towards smart weld for the monitoring of tubular structures using ultrasonic guided waves. E-Journal of NDT, ISSN 1435-4934.

[165] Yagati, K.P., Bathe, R.N., Rajulapati, K.V., Sankara Rao, K.B., Padmanabham, G., 2014. Fluxless arc weld-brazing of aluminium alloy to steel. Journal of Materials Processing Technology 214, 2949–2959.

[166] Young, P., 2020. How to Weld Thin Metal - Welding Headquarters [WWW Document]. weldingheadquarters.com. URL https://weldingheadquarters.com/how-to-weld-thin-metal/ (accessed 1.18.22).

[167] Yuen, P.K., 2016. Embedding objects during 3D printing to add new functionalities. Biomicrofluidics 10, 044104.

[168] Zhang, C., Li, Y., Gao, M., Zeng, X., 2018. Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source. Materials Science and Engineering: A 711, 415–423.

[169] Zhang, C., Shen, C., Hua, X., Li, F., Zhang, Y., Zhu, Y., 2020. Influence of wire-arc additive manufacturing path planning strategy on the residual stress status in one single buildup layer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 111, 797–806.

[170] Zhang, X., Alemohammad, H., Toyserkani, E., 2013. Sensitivity alteration of fiber Bragg grating sensors with additive micro-scale bi-material coatings. Measurement Science and Technology 24, 025106.

[171] Zhang, X., Choi, H., Datta, A., Li, X., 2006. Design, fabrication and characterization of metal embedded thin film thermocouples with various film thicknesses and junction sizes. Journal of Micromechanics and Microengineering 16, 900–905.

[172] Zhang, Y., Meng, F., Song, Y., Dong, M., Zhu, L., 2019. Characterization of metallic-packaging fiber Bragg grating sensors with coated and bare fibers. Applied Optics, 58, 1426–1432.

[173] Zhao, D., Guo, W., 2020. Shape and Performance Controlled Advanced Design for Additive Manufacturing: A Review of Slicing and Path Planning. Journal of Manufacturing Science and Engineering 142.

[174] Zhao, Y., Xiao, J., Chen, S.J., 2017. Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Components Manufactured by CMT. Materials Science Forum 898, 1318–1324.

[175] Zimermann, R., Mohseni, E., Lines, D., Vithanage, R.K.W., MacLeod, C.N., Pierce, S.G., Gachagan, A., Javadi, Y., Williams, S., Ding, J., 2021. Multi-Layer Ultrasonic Imaging of As-Built Wire + Arc Additive Manufactured Components. Additive Manufacturing 102398.

Table des Figures

Figure 1 Exemple de cellule robotisée WAAM (FRONIUS France, 2017a) 4
Figure 2: Installation WAAM-CMT avec plateau chauffant présente sur la plateforme GINOVA de S.mart Dauphiné Savoie 5
Figure 3: Schéma de principe de soudure MIG (FRONIUS France, 2017b) 5
Figure 4: Décomposition du mouvement du fil permettant le transfert de matière du mode CMT (Wesling et al., 2010)..... 6
Figure 5: Description du mode CMT (FRONIUS France, 2017a) 7
Figure 6: Description du mode CMTP (FRONIUS France, 2017a) 7
Figure 7: Description du mode CMTA (FRONIUS France, 2017a)..... 7
Figure 8: Description du mode CMTPA (FRONIUS France, 2017a)..... 7
Figure 9: Influence de l'énergie de soudure sur le mouillage du cordon et le recouvrement de cordons 8
Figure 10: Mouillage du cordon pour différente valeur de Φ= W/H 8
Figure 11: Vue de haut et de côté d'un cordon de soudure 8
Figure 12: Vue de haut et de côté de cordons de soudures irréguliers : (en haut) trop énergétique (en bas) pas assez énergétique « humping » 9
Figure 13: Manque de recouvrement sur 2 cordons juxtaposés (Ma et al., 2019)..... 11
Figure 14: Défaut de non planéité due à une distance entre cordons trop grande ou trop faible (Xiong et al., 2013)..... 11
Figure 15: Classification des modes de transfert sur un graphique tension-intensité (FRONIUS France, 2017b) 14
Figure 16: Classification des modes CMT par rapport aux autres mode de transfert sur un graphique tension-intensité (FRONIUS France, 2017a)..... 14
Figure 17: Graphique Puissance-WFS des synergies CMT disponibles pour un fil AlSi5 de diamètre 1,2 mm et un gaz 100 % Ar..... 15
Figure 18: Energie massique des synergies disponibles pour un fil AlSi5 de diamètre 1,2mm 16
Figure 19: Evolution du nombre de cycle à polarité négative par rapport au nombre de cycle à polarité positive pour une balance EP/EN allant de -5 à 5 pour les lois CMTA et CMTPA disponibles pour du fil AlSi5 en 1,2mm 17
Figure 20: Evolution de la puissance développée par la soudure en fonction de EP/EN pour la loi CMTA 1368 17
Figure 21: Définition des distances torche-substrat (millerwelds.com, 2019) 18
Figure 22: Impact du stickout sur WFS et U d'un cycle CMT (FRONIUS France, 2010)..... 18
Figure 23: Définition du Work Angle et du Travel Angle (Villumsen and Kristiansen, 2015)..... 18
Figure 24: Schéma du mouvement de reflux créant le phénomène de "humping"(Adebayo et al., 2013)..... 19
Figure 25: Cordons irréguliers présentant un défaut de "humping" 19
Figure 26: Transfert de chaleur par conduction et par convection pour un cordon, un mur et un bloc (Cunningham et al., 2018) 20
Figure 27: Modèle de recouvrement FOM..... 21
Figure 28: Modèle de recouvrement TOM..... 21
Figure 29 : Répartition de l’aire du modèle FOM..... 21
Figure 30: Réalisation de pièce massive par balayage (Ma et al., 2019)..... 22
Figure 31: Trajectoires classiques(Ding et al., 2015)..... 22
Figure 32: Trajectoires complexes (Ding et al., 2015) 22

Figure 33: Dépose en zigzag discontinu 23
Figure 34: Dépôt Longitudinal et Transversal 23
Figure 35: Dépôt sur deux couches successives 24
Figure 36: Chaîne de mesure 28
Figure 37 : Capteur actif et passif à transformation directe et indirecte 29
Figure 38 : Constitution des familles de capteurs pour l'enfouissement 29
Figure 39: Corps d'épreuve pour dynamomètre en S (Parmantier and Kratz, 2009b) 30
Figure 40: Corps d'épreuve pour dynamomètre en double C (Parmantier and Kratz, 2009b) 30
Figure 41 : Imagerie par Sonde Ultrasonore Multiéléments (Bacelar, 2017) 33
Figure 42 : Imagerie par thermographie (Bacelar, 2017) 33
Figure 43 : Imagerie par radiographie (Lopez et al., 2018) 33
Figure 44 : Imagerie par réseau de sondes à courants de Foucault (Chauveau, 2018) 33
Figure 45 : Utilisation de contre-forme (Shape converter) pour un procédé SLA (Kataria and Rosen, 2001) 39
Figure 46: Masque (gris) permettant de recouvrir le reste de la zone de travail autour de l'insert en EBM (Hossain et al., 2016) 40
Figure 47: Assemblage aluminium-acier par pièce de transition bimétallique 41
Figure 48 : Influence d'une contrainte (↔) sur la direction de l'axe de facile aimantation (==>) d'un matériau magnétostrictif isotrope à champ nul (Hartemann, 1999) 46
Figure 49: Localisation pour les deux modes de rupture identifiés (Lin et al., 2013) 48
Figure 50 : Localisation de la concentration de contrainte pour une rupture à l'interface (Lin et al., 2013) 48
Figure 51 : Modélisation des différentes couches de l'éprouvette de traction inox-acier (Li et al., 2019) 48
Figure 52 : Modélisation des contraintes à l'interface inox-acier (Li et al., 2019) 48
Figure 53 : Principe de superposition appliqué à un cylindre traversant encastré dans une plaque en traction (Deryugin and Lasko, 2012) 49
Figure 54 : Répartition des contraintes principales et de cisaillement maximal dans la plaque et dans le cylindre encastré (Deryugin and Lasko, 2012) 49
Figure 55: Energie massique de la loi CMTPA 1369 en fonction de WFS 54
Figure 56: Scans de cordons soudés 55
Figure 57: 7 sections du cordon 8-8,3-5 ($\lambda ratio$-WFS-EP/EN) 55
Figure 58: Graphique d'aide à la sélection de paramètres de soudage (Φ vs Energie massique) 56
Figure 59: Expérience de sélection de la température « d'interpass » 57
Figure 60: Dimensions des cordons de seconde couche pour différentes températures « d'interpass » 57
Figure 61:Trajectoire zigzag avec prise en compte des surépaisseurs 58
Figure 62: Sens et ordre de parcours de la trajectoire sélectionnée sur deux couches successives 59
Figure 63: Photo du Bloc L 60
Figure 64: Photo du Bloc T 60
Figure 65:Dimensions nominale de l'éprouvette 60
Figure 66: Photo d'une éprouvette extraite du bloc T 60
Figure 67: Schéma de placement des éprouvettes dans le Bloc L 60
Figure 68: Schéma de placement des éprouvettes dans le Bloc T 60
Figure 69 : Première étape de contournage sur le Bloc T 61
Figure 70: Seconde étape de contournage dans l'épaisseur d'un sous-bloc 61
Figure 71: Bloc T Contourné en 2 sous blocs 61
Figure 72: Sous-bloc contourné dans l'épaisseur du bloc L 61

Figure 73: Machine de traction MTS4M et système ARAMIS de suivi de déformation 61
Figure 74: Eprouvette marquée et tenue dans la machine de traction 61
Figure 75 : Limite d'élasticité des éprouvettes extraites 62
Figure 76 : Limite à la rupture des éprouvettes extraites 62
Figure 77 : Allongement à la rupture des éprouvettes extraites 62
Figure 78 : Calcul par somme pondérée des notes des différentes technologies pour leur insertion dans une pièce donnée 68
Figure 79 : Couches de protection pour l'insertion d'une jauge de contrainte durant un procédé SLM en acier inoxydable (Li et al., 2000)..... 70
Figure 80 : Pièce intelligente réalisée en deux étapes par procédé EBM (Hossain et al., 2016) 70
Figure 81 : Montage de pont de Wheatstone en fonction du nombre de jauge (Bennour, 2016)..... 71
Figure 82 : Jauge de contrainte pelliculaire unidirectionnelle (Parmantier and Kratz, 2009a)..... 71
Figure 83 : jauge de contrainte pelliculaire en rosette (Parmantier and Kratz, 2009a)..... 71
Figure 84 : Fibre de Bragg insérée au cours d'un procédé SLM inox (Havermann et al., 2015) 72
Figure 85 : Fibre de Bragg insérée au cours d'une soudure laser étain (Grandal et al., 2018) 72
Figure 86 : Déphasage induit à chaque interface dans un réseau de Bragg (Wikimedia Commons) ... 73
Figure 87 : Spectres réfléchis et transmis par une fibre inscrit avec trois réseaux de Bragg (Ferdinand, 2018)..... 73
Figure 88 : Décalage de la longueur d'onde reflété dû à la déformation de la fibre de Bragg (Luyckx et al., 2015)..... 73
Figure 89 : Inspection ultrason par immersion d'un mur WAAM partiellement usiné (Chabot et al., 2020)..... 76
Figure 90: Inspection d'un mur WAAM non usiné par sonde souple (Zimermann et al., 2021)..... 76
Figure 91 : Détection par sonde multiéléments de défauts dans un mur titane fait en WAAM (Zimermann et al., 2021)..... 77
Figure 92 : Détection par sonde multiéléments de perçages dans un mur aluminium fait en WAAM (Javadi et al., 2019a)..... 77
Figure 93 : Détection de défauts par sonde IOnic à courant de Foucault (Bento et al., 2019)..... 79
Figure 94 : Sonde à courant de Foucault et à chute de potentiel (Bacelar, 2017)..... 79
Figure 95: Mesure de chute de potentiel en courant continu par méthode des 4 pointes (Bacelar, 2017)..... 79
Figure 96 : Variation de µmax en fonction de la déformation pour un acier a) St3 ; b) C45 c) C45+QT (Gorkunov et al., 2007)..... 80
Figure 97 : Effet d'une contrainte T sur la courbe B-H du Nickel et du Permalloy (Hartemann, 1999) 81
Figure 98 : Evolution de $\lambda s\sigma$ d'un acier Fe-3Si en traction en fonction de la contrainte pour H = H_s (Iordache, 2003) 81
Figure 99 : Longeron d'aile d'avion réalisé en WAAM (Williams et al., 2016) 83
Figure 100 : Crochet de levage réalisé en WAAM (Jackson, 2018) 83
Figure 101 : Montage de la sonde développée permettant de réaliser un C-Scan d'une cible en acier caché sous une plaque d'aluminium 86
Figure 102 : C-scan de la variation de phase de l'impédance du capteur développé pour une cible circulaire en acier caché sous une plaque d'aluminium 86
Figure 103 : Impédance Z1 mesurée sur la pièce non déformée sans le témoin 86
Figure 104 : Impédance Z2 mesurée sur la pièce déformée sans le témoin..... 86
Figure 105 : Impédance Z3 mesurée sur la pièce non déformée avec le témoin 87
Figure 106 : Impédance Z4 mesurée sur la pièce déformée avec le témoin 87
Figure 107: Détérioration d'un témoin fin en acier causée par une soudure aluminium non adaptée 92
Figure 108: Non mouillage de cordons de soudure en alliage d'aluminium sur un témoin en acier ... 92

Figure 109 : Témoin à plat sur le substrat 92
Figure 110: Vue de face d'un cordon soudé à un témoin en acier galvanisé 94
Figure 111: Schéma en vue de dessus du cordon obtenu en contact avec le témoin 94
Figure 112: Première étape de l'enfouissement du témoin 94
Figure 113: Seconde étape de l'enfouissement du témoin 94
Figure 114: Témoin partiellement enfoui 94
Figure 115 : Configuration témoin à la verticale 95
Figure 116 : Photo de la configuration 95
Figure 117 : Détérioration au dos des témoins pour un offset trop faible 95
Figure 118 : témoin non lié avec un cordon pour un offset trop grand 95
Figure 119:Extractions des échantillons sur les soudures réalisées 96
Figure 120 : Echantillons prédécoupés 96
Figure 121 : Echantillon dans le tomographe 96
Figure 122 : Processus de réalisation des cartes d'épaisseur 97
Figure 123 : Echelle des cartes d'épaisseur 98
Figure 124 : Carte d'épaisseur du témoin (offset = 1,5 mm) 98
Figure 125 : Carte d'épaisseur du témoin (offset = 2 mm) 98
Figure 126 : Carte d'épaisseur du témoin (offset = 2,5 mm) 98
Figure 127 :Carte d'épaisseur du témoin (offset = 3 mm) 98
Figure 128 : Vue xz de la tranche de l'échantillon avec un offset de 3,0 mm (détachement (en noir) entre l'acier du témoin (en blanc) et l'alliage d'aluminium du cordon (en gris)) 98
Figure 129 : Processus de préparation de l'échantillon et d'analyse au MEB 99
Figure 130 : Vue de l'interface aluminium-acier à l'endroit où elle est la plus large 100
Figure 131: Analyse EDS au point repéré sur Figure 130 100
Figure 132 : Analyse EDS Fe, Al, Si le long de la ligne verte de l'interface témoin-soudure vers la soudure 100
Figure 133: Chaîne de mesure 105
Figure 134: Evolution de la perméabilité magnétique moyenne dans un acier en fonction de sa déformation en charge 106
Figure 135 : Vue en coupe longitudinale de l'éprouvette pour la caractérisation du couplage mécanique témoin-pièce avec isolation de l'environnement autour du témoin 109
Figure 136 : Dimensions du modèle 109
Figure 137: Conditions aux limites du modèle 109
Figure 138: Zoom sur l'interface témoin-pièce au niveau du congé (rayon du congé : 0,1 mm ; ligne surlignée : 0,04 mm) 109
Figure 139: Abaque pour scénarios 1 et 2 : limite d'élasticité du témoin élevée 110
Figure 140 : Abaque pour scénarios 3 et 4 : limite d'élasticité du témoin faible 110
Figure 141 : Contrainte rémanente du témoin en fonction de la contrainte locale en charge (contrainte du témoin en charge en pointillé noir, décharge en bleu) 111
Figure 142 : Abaques de couplage mécanique pour les trois environnements étudiés 113
Figure 143: Pentes alpha et beta des abaques pour différentes définitions du local pour un témoin à faible limite d'élasticité (100 % : $\alpha = 0{,}4851$ & $\beta 2 = 44{,}672$) 113
Figure 144 : Abaque de couplage pour un témoin à forte limite d'élasticité 114
Figure 145 : Abaque de couplage pour un témoin à faible limite d'élasticité déchargé 114
Figure 146: Répartition de la contrainte en charge pour le point entouré Figure 145 114
Figure 147: Répartition de la contrainte en rémanence pour le point entouré Figure 145 114
Figure 148 : Dimensions de la demi-poutre d'épaisseur 8mm 115
Figure 149: Conditions aux limites de la poutre 116

Figure 150 : Zoom sur le maillage au niveau du congé 116
Figure 151: Répartition de la contrainte dans la zone de placement pour $\sigma maxi = \sigma e$ (pour les scénarios 1 et 3) 117
Figure 152: Répartition de la contrainte dans la poutre lorsque celle-ci a faiblement plastifié (F=770N) 117
Figure 153: Répartition de la contrainte dans la zone de placement pour $\sigma maxi = \sigma r$ (pour les scénarios 2 et 4) 117
Figure 154: Répartition de la contrainte dans la poutre lorsque celle-ci a fortement plastifié (F=2080N) 118
Figure 155: Traduction de la contrainte dans la zone de placement pour les scénarios 1 et 3 118
Figure 156: Traduction de la contrainte dans la zone de placement pour les scénario 2 et 4 119
Figure 157: Abaque de lecture de la contrainte maximale à partir de la contrainte locale pour tous les scénarios 120
Figure 158: Dimensions de la poutre avec le témoin encastré à 10 mm pour les scénario 1 et 3 121
Figure 159: Dimensions de la poutre avec le témoin encastré à 45 mm pour le scénario 4 121
Figure 160: Dimensions de la poutre avec le témoin encastré à 60 mm pour le scénario 2 121
Figure 161: Zoom sur le maillage de la tranche du témoin 121
Figure 162: Zoom sur le maillage de la face supérieure de la poutre au niveau du témoin 121
Figure 163 : Influence du maillage entre la poutre initiale et les poutres de contrôle sur la variation de la contrainte maximale dans le domaine plastique 122
Figure 164: Influence de l'affectation du matériau au éléments du témoin dans le modèle de contrôle sur la variation de la contrainte maximale sur le domaine plastique 123
Figure 165 : Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 2, (zoom sur la zone plastique Figure 176 en annexe) 124
Figure 166 : Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 3 124
Figure 167 : Ordre et sens de parcours de la torche pour la réalisation du crochet en vue de dessus avec masselotte au contact du témoin en noir 125
Figure 168 : vue suivant la Coupe AA (Figure 167) de l'ordre des étapes de réalisation du crochet par rapport au témoin en noir (gauche) et vue en cours de réalisation avec la masselotte au contact du témoin (droite) 126
Figure 169: Conditions aux limites du modèle 126
Figure 170 : Dimensions du crochet d'épaisseur 40 mm 126
Figure 171 : Zoom sur le maillage au niveau du congé du crochet (arrête surlignée = 0,55 mm) 126
Figure 172: Répartition de la contrainte dans le crochet pour F=16400N 127
Figure 173 : Répartition de la contrainte dans la zone de placement du crochet de levage 127
Figure 174 : Traduction de la contrainte dans la zone de placement du crochet de levage pour le scénario 3 127
Figure 175: Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 1 136
Figure 176 : Zoom sur la zone plastique de la Figure 165 136
Figure 177: Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 3 136
Figure 178 : zoom sur la zone plastique du témoin sur la Figure 177 136
Figure 179: Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 4 137
Figure 180 : Zoom sur la zone plastique Figure 179 137

Figure 181 : Contrainte maximale en fonction de la contrainte témoin rémanente déterminée par la méthode et comparée à celle obtenue avec le modèle ayant un témoin enfoui pour le scénario 4 . 137
Figure 182 : zoom sur la zone plastique du témoin Figure 181 137

Table des Tables

Tableau 1: Classification des paramètres de fabrication WAAM 12
Tableau 2: Tableau récapitulatif des écarts vecteurs recommandés en fonction du modèle de recouvrement et de cordon choisi 21
Tableau 3: Tableau de synthèse des paramètres de fabrication WAAM 25
Tableau 4: Méthodes d'évaluations et caractéristiques 37
Tableau 5: Paramètres de soudage fixés 53
Tableau 6: Niveaux des paramètres testés lors du plan d'expérience 54
Tableau 7:Récapitulatif des paramètres de soudures et dimensions géométriques du cordon sélectionné 56
Tableau 8:Récapitulatif des paramètres fixés et proposés dans cette section 59
Tableau 9: Récapitulatif des propriétés mécaniques des éprouvettes extraites 63
Tableau 10: Récapitulatif des propriétés mécaniques obtenus dans la littérature pour alliage d'aluminium 4043 (AlSi5) 63
Tableau 11 : Description des critères d'évaluation d'un système de mesure 68
Tableau 12 : Evaluation suivant les critères sélectionnés des jauges de contraintes 72
Tableau 13 : Evaluation suivant les critères sélectionnés des capteurs à fibre de Bragg 74
Tableau 14 : Etat de l'art du contrôle de pièce WAAM par méthode PAUT 76
Tableau 15 : Evaluation suivant les critères sélectionnés des technologies de CND par imagerie d'un témoin enfoui 78
Tableau 16 : Evaluation suivant les critères sélectionnés des technologies de CND par induction de la perméabilité magnétostrictive d'un témoin 82
Tableau 17 : Récapitulatif des évaluations des technologies présentées 82
Tableau 18 : Attribution des poids sur les critères de sélection pour l'insertion d'une technologie de mesure dans un longeron 83
Tableau 19 : Attribution des poids sur les critères de sélection pour l'insertion d'une technologie de mesure dans un crochet de levage pour pièce légère 84
Tableau 20 : Récapitulatif des poids attribués sur chaque critère pour les deux pièces exemples 84
Tableau 21 : Scores établis par chaque technologie pour les deux pièces considérées 85
Tableau 22: Composition chimique de l'acier DX51D (% en masse max.) 91
Tableau 23 : Paramètres de soudage pour insertion 91
Tableau 24 : Caractéristiques cordon pour insertion 91
Tableau 25 : Modification des paramètres de fabrication pour l'insertion 91
Tableau 26 : Résultats de l'expérience préliminaire 93
Tableau 27 : Taille de voxel pour chaque échantillon 97
Tableau 28: Scénarios de mesure 103
Tableau 29: Conditions d'utilisation du témoin pour chaque scénario 104
Tableau 30: Préconisation sur les caractéristiques mécaniques du témoin 105
Tableau 31: Caractéristiques mécaniques des matériaux testés 109
Tableau 32: Caractéristiques du maillage 109
Tableau 33: Bornes définissant la limite d'élasticité du témoin pour chaque scénario 112
Tableau 34: Détail maillage poutre 116
Tableau 35: Détail du maillage de la poutre 121
Tableau 36: Détail du maillage 126

Fin

« La facilité, c’est l’esclavage »

Je dédie ces travaux à ma grand-mère.