

Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc

Julien Chapuis

► To cite this version:

Julien Chapuis. Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc. Mécanique [physics.med-ph]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2011. Français. tel-00600292

HAL Id: tel-00600292

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00600292>

Submitted on 14 Jun 2011

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.

UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2
– Sciences et Techniques du Languedoc –

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2

Discipline : Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil
Formation Doctorale : Mécanique des matériaux et des milieux complexes,
des structures et des systèmes
École Doctorale : Information, Structures et Systèmes

Présentée et soutenue publiquement par

Julien CHAPUIS

9 Mars 2011

Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc

JURY :

R. FABBRO	Directeur de Recherche - CNRS/Arts et Métiers ParisTech	Rapporteur
R. BILLARDON	Professeur à l'Université Pierre-et-Marie-Curie - Paris 06	Rapporteur
O. ASSERIN	Ingénieur - CEA Saclay	Examineur
P. PEYRE	Directeur de Recherche - CNRS/Arts et Métiers ParisTech	Examineur
B. WATTRISSE	Professeur à l'Université Montpellier 2	Président
M. MÉDALE	Professeur à Polytech'Marseille	Invité
F. SOULIÉ	Maître de Conférences à l'Université Montpellier 2	Co-encadrant
C. BORDREUIL	Maître de Conférences à l'Université Montpellier 2	Co-encadrant
G. FRAS	Professeur à l'Université Montpellier 2	Directeur

Ce travail n'aurait pu être effectué sans l'accord, le soutien et l'aide de plusieurs personnes.

Je tiens à remercier Pierre Alart, alors directeur du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, ainsi que Gilles Fras, responsable de l'équipe Assemblages Soudés et aussi mon directeur de thèse, qui m'ont accueilli et fourni le cadre nécessaire à la réalisation de cette thèse.

J'exprime ma plus vive gratitude à Cyril Bordreuil alias "BoBoR", ainsi qu'à Fabien Soulié alias "Papa Ours", tous deux Maîtres de Conférence à l'Université Montpellier 2, pour la confiance qu'ils m'ont accordé, pour leur accueil et leur encadrement durant toute la durée de cette thèse, en me faisant partager leur enthousiasme pour la recherche et leur grande expérience et se rendant toujours disponibles.

J'adresse évidemment mes sincères remerciements à l'ensemble du jury : le président Bertrand Wattrisse (Professeur à l'Université Montpellier 2), les deux rapporteurs, Rémy Fabbro (Directeur de Recherche aux Arts et Métiers - ParisTech) et René Billardon (Professeur à l'Université Pierre-et-Marie-Curie - Paris 06), les examinateurs, Patrice Peyre (Directeur de Recherche aux Arts et Métiers - ParisTech), Olivier Asserin (Ingénieur - CEA Saclay) et Marc Médale (Professeur à Polytech'Marseille).

Je n'oublierai évidemment pas Denis Cervellin (Directeur des études à Polytech'Montpellier département Mécanique - FQSC), Edward Romero alias "le Physicien Fou" (post doctorant 2008-2010, recruté sur l'ANR TEMMSA, Jeunes Chercheurs 2007), Reine Bonnet-Causse (Secrétaire de l'équipe), Yves El Kaïm (Ingénieur de Recherche - CNRS), Nicole Helaine (the best english teacher of the world!), ainsi que Kévin Champainne et Jacques Pech (techniciens à l'IUT de Nîmes) pour leurs précieuses contributions.

Comment ne pas citer les membres de la "Welded Team" qui ont partagé mon quotidien durant ces années et qui ont apporté beaucoup de bonne humeur. Par ordre d'apparition : Frédéric Deschaux-Beaume (MCF - UM2), Aurélie Niel (Doctorante - UM2), Sébastien Rouquette alias "l'ours" (MCF - UM2), Vincent Villaret "Bichette un café!" (Doctorant CIFRE, UM2 - Air Liquide) et Sreedhar Unnikrishnakurup (Doctorant - UM2).

Cela va de soi, je remercie évidemment ma famille pour son irremplaçable et inconditionnel soutien et en particulier mes grands parents maternels pour avoir fait le déplacement le jour de ma soutenance.

Merci aux membres du Département Génie Mécanique et Productique de l'IUT de Nîmes pour leur accueil chaleureux.

Le plus fort de mes remerciements est pour Isabelle. Merci de m'avoir tenu la main jusqu'aux dernières lignes de ce mémoire. Merci d'être là tous les jours. Aussi je remercie notre fils Noé pour ses "Areuh, areuh..." sources d'énergie positive au quotidien.

Enfin, je dédie ce travail à mes parents.

Table des matières

Introduction	9
1 Le soudage à l'arc : une technique pluridisciplinaire	13
1.1 Introduction	13
1.2 Les principales technologies des procédés à l'arc	15
1.2.1 Sources de courant pour le soudage à l'arc	15
1.2.2 Procédés de soudage à l'arc sous flux gazeux	17
1.2.3 Solutions industrielles pour le contrôle du procédé	26
1.3 L'opération de soudage : un milieu sous sollicitations extrêmes	27
1.3.1 L'arc électrique en soudage	28
1.3.2 Transferts métalliques en GMAW	33
1.3.3 Mouvements de convection dans le bain fondu	37
1.3.4 Transfert thermique	45
1.3.5 Conséquences métallurgiques des cycles thermiques en soudage	52
1.3.6 Conséquences mécaniques associées au soudage	52
1.4 Couplages et interactions multiphysiques	54
1.5 Conclusion	56
2 Instrumentations en soudage	57
2.1 Introduction	57
2.2 Composition de l'outil expérimental	59
2.3 Description de l'environnement de mesures	59
2.3.1 Perturbations de type électrostatiques et électromagnétiques	61
2.3.2 Les ondes électromagnétiques	65
2.3.3 Une source de chaleur	65
2.3.4 Projections et fumées	65
2.3.5 Phases d'amorçage et d'extinction d'arc	66
2.4 Méthodes de mesures développées	66
2.4.1 Le procédé : énergie à la source	66
2.4.2 La thermique : énergie transmise	68
2.4.3 La mécanique : déplacements, déformations	72
2.4.4 Visualisation : bain de fusion, transfert métallique	73
2.4.5 Instrumentations complémentaires	80
2.5 Synchronisation des mesures	82
2.5.1 La solution matérielle	82
2.5.2 Logiciel d'acquisition	84
2.6 Conclusion	87

3	Une approche expérimentale multiphysique	89
3.1	Introduction	89
3.2	Optimisation des procédés à l'arc	91
3.2.1	Un constat "mono-problématique"	92
3.2.2	L'approche proposée	93
3.3	Définition de la base de données expérimentales	94
3.3.1	Traçabilité des expériences	94
3.3.2	Structuration des données	94
3.4	Bibliothèque d'Analyse de Mesures Expérimentales : BAME	95
3.4.1	Modules et structure	96
3.4.2	Performances	98
3.4.3	Exemples	99
3.5	Traitement d'images en soudage à l'arc	102
3.5.1	erCv	103
3.5.2	Bain de fusion en GTAW	105
3.5.3	Gouttelette transférée en GMAW pulsé	107
3.6	Conclusion	110
4	Etudes pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc	111
4.1	Introduction	111
4.2	Mesures d'efforts en soudage GTAW	112
4.2.1	Expérimentation	112
4.2.2	Modélisation numérique	114
4.2.3	Résultats	117
4.2.4	Discussion	121
4.3	Etude acoustique en GMAW	122
4.3.1	Expérimentation	123
4.3.2	Résultats	123
4.3.3	Conclusion	127
4.4	Conclusion	128
5	Comportement dynamique d'une opération de soudage stationnaire en MIG-MAG pulsé	129
5.1	Introduction	129
5.2	Définition du système étudié et protocole expérimental	130
5.2.1	Objet de l'étude, grandeurs et hypothèses	130
5.2.2	Protocole expérimental, traitement des données	131
5.3	Résultats expérimentaux et discussions	137
5.3.1	Analyse de l'essai de référence (type R)	138
5.3.2	Analyse de sensibilité aux paramètres procédé	146
5.4	Discussions : analyse adimensionnelle	155
5.4.1	Approche par le Théorème de Buckingham-Pi	155
5.4.2	Application à la macro-goutte et discussions	158
5.5	Conclusion	165
6	Perspectives pour l'analyse d'une instabilité en Soudage Grande Vitesse	167
6.1	Introduction	167
6.2	Éléments bibliographiques	169
6.3	Analyse préliminaire du phénomène de humping	172
6.3.1	Identification du humping en cours de soudage	172
6.3.2	Conséquences du humping sur la soudure	173
6.4	Une expérience dimensionnelle	173

6.4.1	Protocole expérimental	173
6.4.2	Résultats : apparition et évolution d'un hump	175
6.5	Discussions	176
6.5.1	Phase d'apparition du phénomène de humping	177
6.5.2	Régime établi du phénomène de humping	178
6.6	Conclusion	182
Conclusion		183
Bibliographie		196
Liste des figures		202
Liste des tableaux		203
A Instrumentations en soudage		205
B Théorème de Buckingham-Pi : procédure d'assemblage		209

Introduction

Contexte, objectifs

Le soudage est une technique d'assemblage utilisée dans la plupart des secteurs industriels (figure 1). Il s'agit d'une technique pluridisciplinaire mobilisant un grand nombre de phénomènes [1; 2]. L'influence de cycles thermiques extrêmement rapides à hautes températures sur les propriétés physiques, métallurgiques et mécaniques des matériaux soudés constitue ainsi un secteur de recherche présent dans la plupart des pays industrialisés.



FIGURE 1 – Le soudage dans son contexte industriel

L'application de ces recherches dans un contexte industriel a pour finalités d'explorer les voies d'optimisation, telles que celles de la productivité, de la qualité des soudures, de l'amélioration de l'environnement de travail. Les solutions industrielles connues à ce jour pour les procédés à l'arc s'illustrent par le développement de sources de puissance qui permettent un contrôle fin de l'énergie délivrée. La souplesse opératoire est ainsi améliorée par une stabilisation de l'arc et une régulation efficace du dévidage des métaux d'apport, d'où un gain en terme de temps de préparation et de parachèvement des assemblages. Une autre voie d'optimisation est celle de la productivité, avec la mise en œuvre du Soudage Grande Vitesse avec les procédés à arc sous flux gazeux.

Il est essentiel de comprendre et d'expliquer les interactions multiphysiques en soudage à l'arc, afin de pouvoir apporter des solutions d'optimisation applicables industriellement [3].

La plupart des articles consacrés à l'étude du soudage à l'arc par une approche expérimentale sont consacrés à l'étude d'une problématique bien spécifique telle que la détermination de la géométrie du bain de fusion par acquisition vidéo [4], l'étude des transferts de matière électrode-pièce [5; 6], ou encore l'étude du plasma [7]. Le développement de ces approches expérimentales en intégrant la prise en compte des couplages semble particulièrement intéressant, aussi bien pour améliorer la compréhension des phénomènes physiques mis en œuvre que pour alimenter les modèles numériques développés depuis quelques années [8].

Dans ce contexte, il semble utile de développer un outil d'acquisition et de traitement de données multiphysiques et multiprocédés. La finalité de ce travail est de pouvoir mesurer différents types de données (procédé, thermique, mécanique, dimensionnelle comme la géométrie du bain de fusion, etc.) dans un environnement fortement perturbateur, et de les faire dialoguer de façon cohérente afin :

1. d'identifier et de comprendre les mécanismes et phénomènes physiques mobilisés dans le soudage à l'arc sous flux gazeux ;
2. d'enrichir la simulation numérique ;
3. et d'étudier des solutions de contrôle pour les procédés Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) et Gas Metal Arc Welding (GMAW).

La démarche de la thèse

La démarche développée au cours de ces travaux de recherche est synthétisée sur la figure 2.

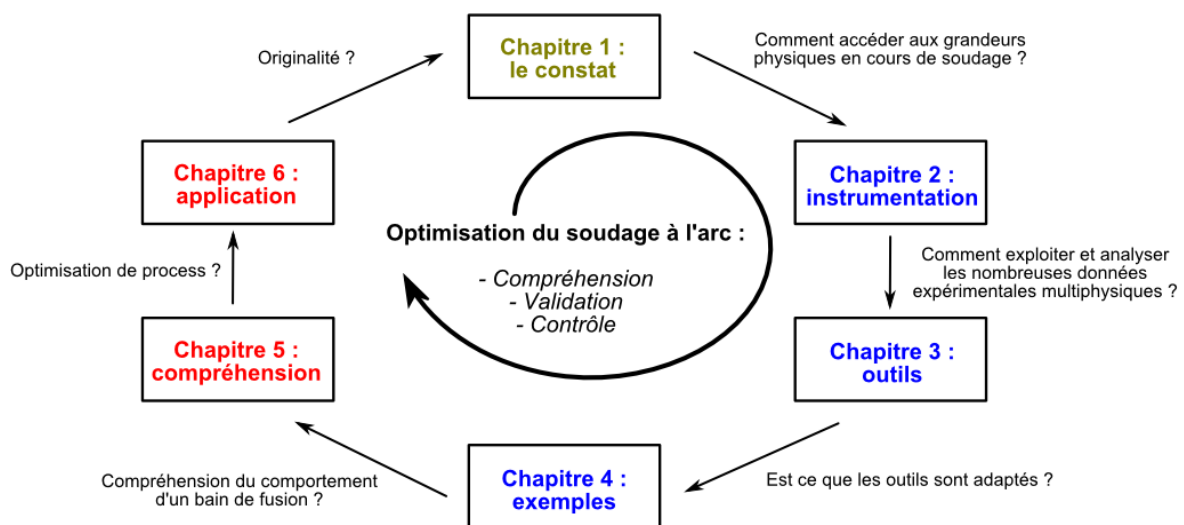


FIGURE 2 – Objectifs et démarche de la thèse

Le premier chapitre présente un état de l'art sur le soudage impliquant les procédés à l'arc, aussi bien sur les aspects technologiques que sur les aspects scientifiques. Cette synthèse bibliographique illustre l'état à ce jour des dernières avancées en terme d'analyse des procédés et de caractérisation expérimentale, et met en évidence l'intérêt de développer une approche couplée alimentée par des données expérimentales multiphysiques.

Ce constat conduit à réfléchir sur les méthodes et les moyens à mettre en œuvre afin d'accéder aux grandeurs physiques en cours de soudage. Le soudage constitue un environnement particulièrement hostile pour la mesure et nécessite le développement de solutions spécifiques comme le présente le chapitre 2. Le choix et le développement d'instrumentations évolutives dédiées aux

études du soudage à l'arc et le dialogue des données multiphysiques par la synchronisation de l'ensemble des moyens de caractérisation expérimentale sont plus particulièrement détaillés.

La mise au point de la plateforme expérimentale s'accompagne d'une réflexion sur la capitalisation des mesures, afin d'enrichir les données collectées au fil des expériences, mais également d'alimenter et de corréler la simulation numérique (Chapitre 3). Pour y parvenir, les développements d'outils numériques pour l'analyse des données sont nécessaires. Ces outils assurent un accès rapide aux données, permettant de croiser les informations d'un essai ou d'une campagne, ou encore de faire dialoguer les résultats expérimentaux et numériques avec les logiciels de simulation numérique du soudage.

Le chapitre 4 illustre l'intérêt et les potentialités de cette approche à travers deux applications qui ont pour objectifs respectifs :

1. l'enrichissement et la validation de la simulation numérique via l'étude des efforts en cours de soudage [9; 10] ;
2. l'étude du signal acoustique en cours de soudage pour le contrôle du procédé **GMAW**.

Le chapitre 5 présente une application plus académique qui concerne l'étude dimensionnelle du comportement d'une macro-goutte de métal liquide sur une cible solide, en configuration statique. L'objectif de cette application est de proposer une démarche permettant de mieux comprendre les mécanismes physiques impliqués et leur importance relative dans le comportement d'un bain de fusion en soudage **GMAW** pulsé [11; 12].

Pour finir, le chapitre 6 présente une application procédé, liée à une problématique industrielle de qualité et de productivité de l'opération de soudage, et plus particulièrement dans le cas du Soudage Grande Vitesse (**SGV**). En effet, lors d'une opération d'assemblage avec de grandes vitesses d'avance et malgré d'importantes énergies délivrées par la source, des défauts géométriques peuvent apparaître dans les cordons de soudure suite à des phénomènes complexes (thermique, hydrodynamique, etc.). Ce chapitre prospectif propose des pistes de réflexion et d'analyse afin de mieux appréhender le phénomène de "humping" et mieux comprendre les mécanismes responsables de son apparition en **SGV** à partir des techniques développées dans ce travail.

Chapitre 1

Le soudage à l'arc : une technique pluridisciplinaire

1.1 Introduction

L'opération de soudage a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Le soudage est une technologie habilitante à la base de grands secteurs industriels parmi lesquels on peut citer le nucléaire, la pétrochimie, la construction navale, l'automobile, l'aéronautique et le génie civil. L'activité économique générée par la fabrication de matériels technologiques associés est considérable au niveau mondial. Pour autant celui-ci est perçu par beaucoup comme une technologie rudimentaire [1]. Les principales avancées scientifiques et technologiques ont pris place entre les années 70 et 90 en phase avec le développement de la pétrochimie et du nucléaire [13]. On peut citer le centre technique de la SAF aujourd'hui Air Liquide Welding pour le développement des matériels de soudage, qui a vu le jour dans les années 60. Dans les années 80, des sociétés utilisant les procédés de soudage comme Framatome ou Areva, et encore Serimer devenu Serimax, ont également créé leur centre technique R&D dans le cadre de leurs applications soudées. Ces applications de plus en plus diversifiées et complexes nécessitent de nouvelles avancées dans l'élaboration des matériaux et donc aussi de nouveaux procédés de fabrication afin d'assurer par exemple leur soudabilité. De plus, les contraintes liées à l'industrialisation de la production demandent une maîtrise de la qualité, donc des procédés de fabrication. Les procédés sont automatisés et/ou robotisés, les opérations d'assemblages sont programmées, leurs suivis en temps réel nécessitent des instrumentations spécifiques (suivi de joint, contrôle des paramètres de soudage). Ainsi, les problématiques dans le contexte des assemblages soudés demandent de plus en plus de compétences et de connaissances dans de nombreuses disciplines des sciences de l'ingénieur. Ces années là, le soudage est passé d'un art empirique à une activité technique pluridisciplinaire.

Les procédés de soudage sont peuvent être classés suivant la nature de la source de chaleur comme :

- Un arc électrique est utilisé en Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Plasma Arc Welding (PAW), et Submerged Arc Welding (SAW) ;
- Un LASER ou un faisceau d'électrons pour les procédés à haute densité d'énergie ;
- Une flamme oxy-acétylénique (chalumeau) ;
- Le soudage mécanique par friction malaxage (FSW) ;
- etc.

Dans le cadre de cette étude, seuls les procédés à l'arc sous flux Gazeux GMAW et GTAW seront considérés. Ils se distinguent par une électrode fusible pour le premier et réfractaire plus un métal d'apport pour le second. Les procédés à l'arc se composent d'un générateur, d'une torche et d'un gaz de protection.

D'un point de vue physique, lors d'une opération de soudage à l'arc, l'interaction de la matière avec le plasma, se manifeste par des phénomènes de transferts thermiques rapides, de fusion et de circulation vigoureuse du métal dans le bain liquide, générés par l'effet combiné de la convection naturelle, les tensions superficielles, les forces électromagnétiques et la poussée de l'arc (figure 1.1). Par conséquent, les forts gradients thermiques et les mouvements de convection du métal liquide affectent le volume et la forme du joint soudé.

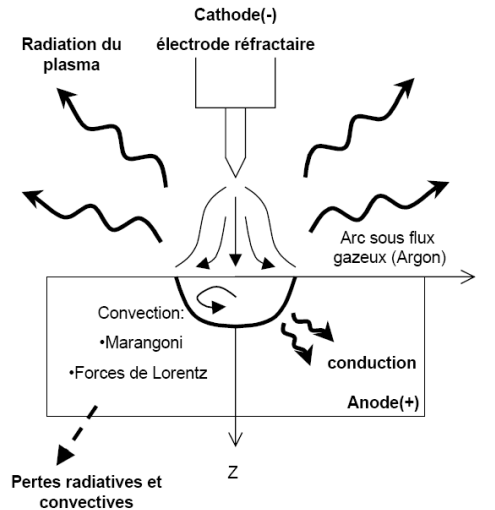


FIGURE 1.1 – Schéma soudage TIG et les phénomènes physiques mis en jeu [8]

La géométrie du bain, les températures du bain et du plasma ont une influence sur les modifications microstructurales. Les taux d'azote, d'oxygène et d'hydrogène au voisinage du métal fondu ainsi que la vaporisation des éléments d'alliage à la surface du bain ont une grande influence sur la composition, la microstructure résultante et sur les propriétés mécaniques de la soudure [1; 3; 14; 15].

Ainsi dans le cadre des applications soudées, il apparaît des couplages multiphysiques forts avec des temps et des longueurs caractéristiques différents. Leurs études semblent primordiales afin de faire évoluer et optimiser les opérations en soudage à l'arc. Il est présenté en premier lieu, l'étude des procédés à l'arc à travers une revue technologique actuelle. Ensuite, les disciplines impliquées pour la description et l'élaboration d'un assemblage soudé sont étudiées : physico-chimie de l'arc, du bain de fusion, puis la thermique et les conséquences métallurgiques et mécaniques. Il est inclus les méthodes de caractérisation expérimentale, la modélisation de ces processus et les solutions de contrôle du procédé proposées à ce jour.

1.2 Les principales technologies des procédés à l'arc

Dans cette section on présente l'aspect technologique du matériel de soudage et on mettra l'accent sur l'enjeu considérable que constitue la recherche sur l'amélioration des sources de puissance pour maintenir : la compétitivité de ces procédés de soudage à l'arc vis à vis des autres technologies d'assemblages et la qualité et l'intégrité des joints réalisés. Aussi cette revue technique permettra d'appréhender les principales sources de bruits induits par le procédé.

1.2.1 Sources de courant pour le soudage à l'arc

Les sources de courant récentes pour le soudage à l'arc sont de technologie onduleur. Elles ont pour avantages d'être moins encombrantes, plus légères et surtout multi-procédés [3] (**Electrode enrobée**, **GTAW** & **GMAW**). Afin de répondre à la demande de la production pour de nombreux matériaux, les fabricants de postes à souder, ont dû imaginer différents types de courants [16]. C'est d'ailleurs, entre autres, pour cet objectif de soudabilité de matériaux de plus en plus complexes métallurgiquement, que la course aux développements de nouvelles sources de courant, toujours plus performantes, reste un défi majeur.

1.2.1.1 Différents courants produits

Le générateur de soudage peut fournir trois types de courant :

1. **du courant continu** : la polarité est choisie suivant l'élément à fondre (électrode ou tôle) dans la mesure où l'élément soumis au bombardement des électrons reçoit la plus grande quantité d'énergie. Ainsi dans le cas du soudage **MIG/MAG** (Metal Inert Gas / Metal Active Gas), sauf cas particulier du soudage utilisant des fils fourrés basiques, il est nécessaire de faire fondre le fil d'apport qui est donc soumis à une polarité positive. Dans ce cas, le terme de polarité inverse est utilisé pour désigner cette configuration de soudage. Au contraire, les torches de soudage **TIG** (Tungsten Inert Gas) utilisent une électrode infusible et afin de préserver l'électrode, une polarité directe est appliquée. En courant continu, une différence de potentiel continue est créée entre l'électrode et la tôle. L'électronique du générateur régule l'énergie fournie à l'arc pour obtenir un transfert stable ;
2. **du courant pulsé** qui est similaire au courant continu mais constitué de deux temps de niveaux d'intensité différents : l'un dit "froid" et l'autre dit "chaud" (figure 1.2). Cette forme particulière du courant permet de gérer l'apport d'énergie dans le métal de base et d'obtenir un transfert de métal sans court-circuit et extinction de l'arc [17].
3. **du courant alternatif** : pour des matériaux de nature bien spécifique et pour des types d'assemblages particuliers (alliages légers principalement), il est parfois nécessaire de produire un arc dont la polarité change régulièrement, il s'agit donc d'un courant alternatif. Les électrons circulent ainsi alternativement vers l'électrode (appelé dans le jargon du soudeur "phase de décapage", de l'alumine par exemple) puis vers la pièce à souder ("phase de pénétration", phase durant laquelle on apporte l'énergie qui fond le métal de base) (figure 1.3).

L'utilisation de trois types de courant permet de produire dans un environnement gazeux un arc électrique (puissance spécifique : de l'ordre de 10 kW.cm^{-2}) dont les caractéristiques doivent satisfaire aux contraintes imposées par la nature des éléments à assembler et par la configuration de l'assemblage. Ces sources vont fortement influencer le comportement dynamique du bain de fusion en **GTAW** comme en **GMAW**. Ces différents modes de courant ne sont pas que différentes manières de délivrer l'énergie pour la fusion du métal de base, mais aussi un moyen pour contrôler la fusion de l'électrode fusible du procédé **MIG**.

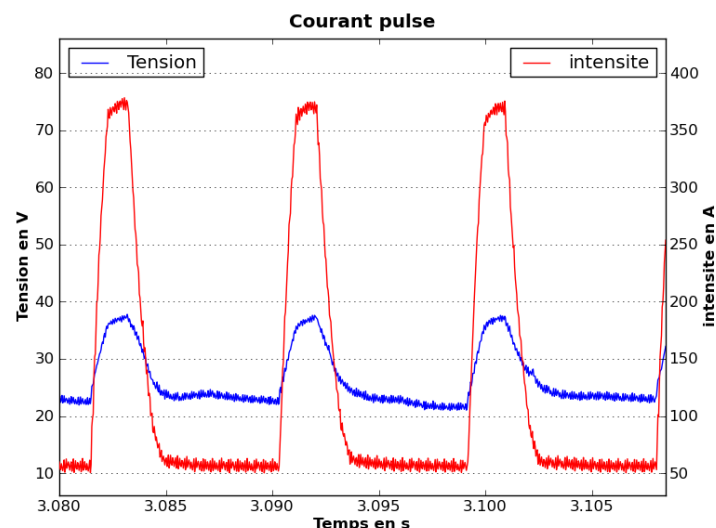


FIGURE 1.2 – Diagrammes tension et intensité pour un régime de soudage pulsé

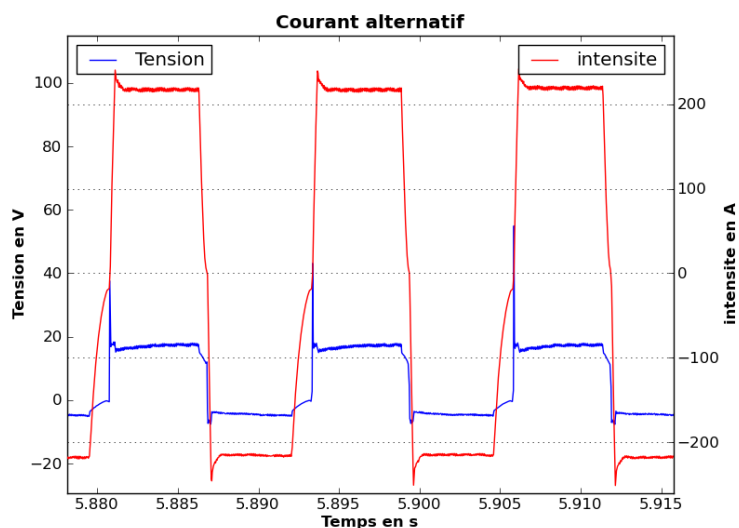


FIGURE 1.3 – Diagrammes tension et intensité pour un régime de soudage alternatif

1.2.1.2 Evolution des technologies

Ces 30 dernières années, la technologie des postes à souder a bien évolué. Particulièrement grâce à l'introduction de l'électronique et du numérique, nous pouvons aujourd'hui réaliser et imaginer de nombreux développements. On pense tout d'abord à la possibilité de contrôler très finement les régimes de courant. On peut programmer et expérimenter avec les générateurs actuels toutes sortes de formes d'ondes de courant ou de tension, suivant le paramètre de soudage que l'on souhaite réguler (en boucle de courant ou en boucle de tension). Par exemple l'apparition des technologies **MIG-MAG CMT[®]** (Cold Metal Transfer) de Fronius[®] [18], **RMD[®]** (Regulated Metal Deposition) de Miller[®] [19] ou encore le **STT[®]** (Surface Tension Transfer) de Lincoln Electric[®] [20] est liée à cette évolution. Pour ces procédés l'innovation réside dans le contrôle du courant (chute instantanée du courant avant le temps d'arc, figure 1.4). Le transfert métallique par court circuit est optimisé en minimisant le taux de projections métalliques et l'énergie transmise à la pièce. A noter, que le procédé **CMT[®]** se distingue par un contrôle mécanique du retrait du

fil d'apport autorisant ainsi le maintien d'un courant faible même en fin du temps de court circuit. Ainsi, la rupture du pont liquide entre l'électrode fusible du procédé et le bain de fusion est garantie sans projections métalliques. Pour les utilisateurs les avantages sont : moins de parachèvement, moins de déformations de l'assemblage. Les modes de transfert seront amplement développés à la section 1.2.2.3.

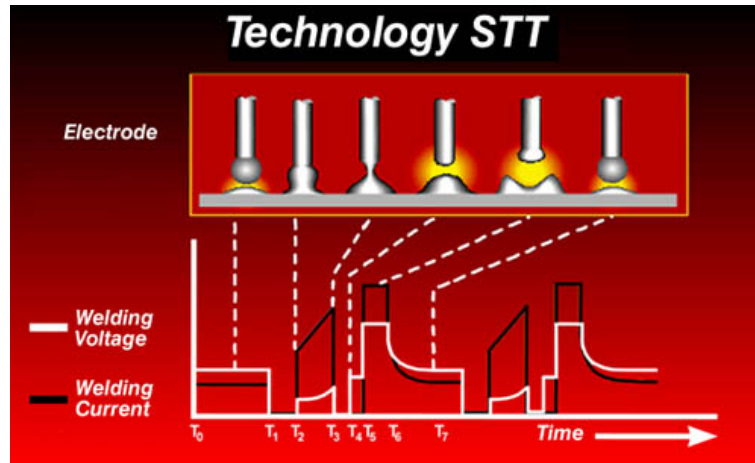


FIGURE 1.4 – Diagrammes tension et intensité pour un court-circuit du procédé MIG-MAG STT[©] (Lincoln Electric[©]) [20]

Ces évolutions ont fait aussi apparaître la notion de synergie en soudage. Une synergie est définie comme une association de plusieurs actions pour l'accomplissement d'une fonction ou d'un effet. Pour le domaine du soudage une synergie est une aide au soudage [21] ; ou plutôt une conjugaison de paramètres qui, grâce à des courbes les reliant, donne la possibilité d'ajuster, pour le soudage en MIG conventionnel (manuel), un paramètre qui est généralement la vitesse fil. De ce paramètre, découlent ensuite tous les autres tel que intensités, tensions, pentes, fréquences et paramètres cycle. Cependant une synergie n'est définie que pour une configuration donnée, c'est à dire que des paramètres inhérents au procédé doivent être choisis auparavant. Par exemple pour le procédé MIG conventionnel, (avant de définir la loi synergique), on fixe la nuance du fil d'apport, son diamètre, le type de gaz utilisé et la matière à assembler. L'épaisseur est un paramètre découlant de la vitesse de fil.

L'évolution des technologies du soudage à l'arc permet un contrôle fin des sources de courant. Ainsi, elle nous donne accès à de nouvelles voies d'optimisation des procédés à l'arc. Comme, les effets combinés d'un transfert métallique par court circuit avec un courant pulsé durant les temps d'arc. La stabilité du transfert est plus grande, le contrôle de la taille des gouttelettes également [18]. Il semble important de bien identifier et comprendre les mécanismes physiques mis en jeu durant une opération de soudage.

1.2.2 Procédés de soudage à l'arc sous flux gazeux

Les deux procédés à l'arc sous flux gazeux étudiés dans nos travaux sont les procédé TIG (GTAW) et MIG-MAG (GMAW). Les caractéristiques spécifiques à chacun de ces procédés sont ainsi mis en évidence (type de gaz de protection, forme de courant).

1.2.2.1 Procédé GTAW ou TIG

Parmi les procédés de soudage à l'arc, le procédé TIG permet de réaliser des soudures de qualité optimale car l'arc électrique est réalisé sans transfert de métal, ce qui lui confère une très grande stabilité [22]. Cet arc électrique est créé et maintenu à l'extrémité d'une électrode de

tungstène (non fusible, figure 1.5), pouvant contenir des éléments d'addition comme le thorium ou l'yttrium qui favorisent l'émission électronique, dans une atmosphère gazeuse inerte.

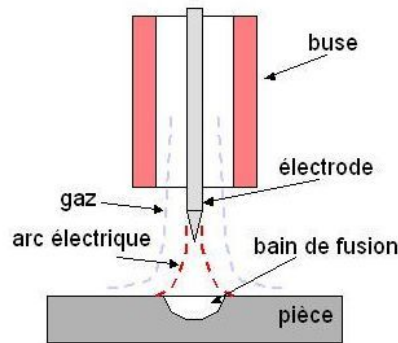


FIGURE 1.5 – Principe du soudage TIG [23]

Le gaz de soudage le plus utilisé est l'argon (Ar). Ce gaz peut aussi être mélangé à de l'hélium ou de l'hydrogène afin d'augmenter la soudabilité. Le matériel du procédé TIG peut se décomposer en trois ensembles qui assurent chacun une fonction de l'opération de soudage :

1. le générateur de courant permet de délivrer un courant continu en mode lisse (de l'ordre de 50 à 400 A) ou pulsé, ou un courant alternatif ;
2. La torche de soudage, composée de l'électrode de tungstène (W), d'une arrivée de gaz, et d'une buse en céramique permettant de canaliser le flux gazeux, et éventuellement équipée d'un circuit de refroidissement. En soudage manuel, la torche est équipée d'une gachette qui permet d'amorcer l'arc électrique et de démarrer le cycle de soudage ;
3. le gaz de protection, qui permet de protéger l'arc et le bain fondu de l'atmosphère ambiante.

Pour le soudage de l'acier, l'arc électrique travaille en polarité directe en *courant continu*. La torche de soudage possède alors la polarité négative (cathode) et la pièce à souder la polarité positive (anode).

L'amorçage de l'arc électrique peut s'effectuer de deux manières : par "lift arc" ou par la création d'une haute tension entre l'électrode et la pièce, qui permet l'ionisation de l'atmosphère gazeuse.

1. Par contact (lift-arc) : Une mise en court-circuit par contact entre l'électrode et la pièce est établie pendant un temps très court permettant une ionisation gazeuse des atomes métalliques. Cette ionisation est suffisante à l'apparition d'un arc qui parvient à s'établir en retirant l'électrode de quelques millimètres (3 mm). Cette méthode est utilisable avec tous les générateurs, elle comporte néanmoins un risque de contamination dû au transfert de particules de Tungstène vers le métal de base et réciproquement.
2. Par hautes fréquences : le générateur permet de créer un arc électrique de faible intensité en appliquant une haute tension (environ 1000 V) à une très haute fréquence (environ 10^6 Hz) entre l'électrode et la pièce. L'ionisation de l'air entre pièce et électrode va permettre la création d'un arc de soudage de forte intensité malgré une tension modeste (environ 20 – 30 V). Cette méthode d'amorçage a pour inconvénient d'engendrer une pollution électromagnétique de l'environnement immédiat.

Le passage du flux d'électrons (arc électrique) est ensuite réalisé de la cathode (électrode) vers l'anode (pièces à souder).

Les phénomènes physiques intervenant lors du soudage à l'arc électrique sont nombreux (phénomènes électriques, dynamique du bain liquide, etc.), et cette étude a notamment pour but d'évaluer l'influence de chacun des paramètres sur la qualité de la soudure. On distingue

cependant les paramètres suivants dont l'influence sur les caractéristiques géométriques (largeur et pénétration) de la soudure est plus ou moins prononcée :

1. les paramètres énergétiques, intensité du courant (I), tension d'arc (image de la hauteur d'arc, U), vitesse de soudage (V_s) ;
2. les caractéristiques de l'électrode (composition chimique, diamètre et angle d'affûtage) ;
3. le gaz de protection (composition et débit) ;
4. les conditions d'échanges thermiques avec le milieu environnant (conditions de bridage, préchauffage éventuel, etc.).

En soudage TIG, le choix de l'électrode dépend à la fois du matériau soudé (nature de l'électrode et affûtage), de son épaisseur (implique le choix de l'intensité et donc du diamètre l'électrode).

Les électrodes employées sont majoritairement constituées de tungstène à plus de 99% en masse auquel on ajoute des oxydes métalliques pour augmenter l'émissivité électronique de l'électrode et donc le rendement. Ces oxydes sont ceux du thorium (ThO_2), du cérium (CeO_2), du lanthane (La_2O_3), du zirconium (ZrO_2) ou d'yttrium (Y_2O_3) finement dispersés dans la phase W. Pour le soudage de l'aluminium, on trouve également des électrodes en tungstène pur. Le diamètre d'électrode est compris entre 1 et 8 mm. Le choix de l'affûtage aura une influence non négligeable sur la forme de l'arc, et donc sur la soudure.

1.2.2.2 Procédé GMAW ou MIG-MAG

Comparativement au procédé TIG, le procédé GMAW se révèle plus rapide, notamment sur les matériaux plus épais. Aujourd'hui ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de production en série de composants notamment robotisée [24; 25].

L'arc électrique qui s'établit entre le fil qui constitue l'électrode fusible et le métal de base provoque d'une part la fusion localisée de ce dernier et d'autre part la fusion de l'extrémité du fil assurant aussi le métal d'apport.

Le fil, généralement de petit diamètre (1.0 mm), est continuellement amené à l'arc de soudage, par un mécanisme de dévidage (figure 1.6). Le matériel nécessaire au soudage par procédé MIG-MAG se décompose en quatre fonctions :

1. le générateur de courant continu en mode lisse ou pulsé ;
2. le dévidoir, qui assure l'amenée du fil fusible de la bobine jusqu'au tube contact à une vitesse donnée. La régularité du dévidage assurant la vitesse du fil est primordiale quant à la stabilité de l'arc et la qualité du soudage. Cette fonction est assurée par des galets d'entraînement motorisés, ces galets peuvent être différents selon la composition, le diamètre et les applications du fil utilisé ;
3. la torche de soudage, composée d'un tube contact, d'une arrivée de fil, de gaz, et d'une buse permettant de canaliser le flux gazeux, et éventuellement d'un circuit de refroidissement ;
4. le gaz de protection, qui permet de protéger l'arc et le bain fondu de l'atmosphère ambiante, et qui peut aussi suivant sa composition avoir un rôle actif dans les propriétés du cordon :
 - (a) le procédé MIG (Metal Inert Gas) emploie un gaz inerte. (Ar ; He ; etc.) ;
 - (b) le procédé MAG (Metal Active Gas) utilise un gaz actif. (CO_2 ; $Ar + O_2$ ou/et CO_2).

L'arc en soudage MIG-MAG est plus utilisé en polarité inverse, le métal d'apport est au pôle positif (Anode). Cette polarité assure une stabilité de l'arc et le fil subit le bombardement électronique. La polarité directe n'est employée que dans le cas d'utilisation de certains fils fourrés qui nécessitent d'être à la cathode.

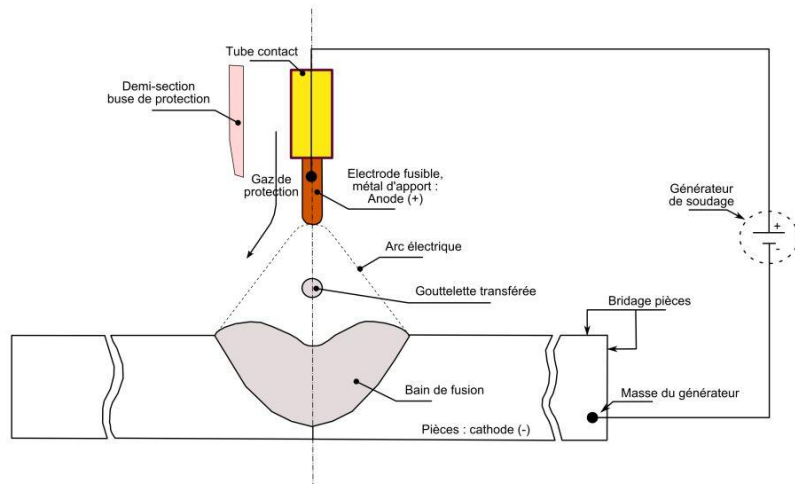


FIGURE 1.6 – Principe du soudage MIG-MAG

1.2.2.3 Modes de transfert métallique en soudage MIG-MAG

Le transfert du métal dans l'arc et la fusion du fil peuvent s'effectuer de différentes façons en fonction de la composition du gaz de protection, de la tension et de l'intensité. Les principaux modes de transfert sont résumés à la figure 1.7 et présentés ci après :

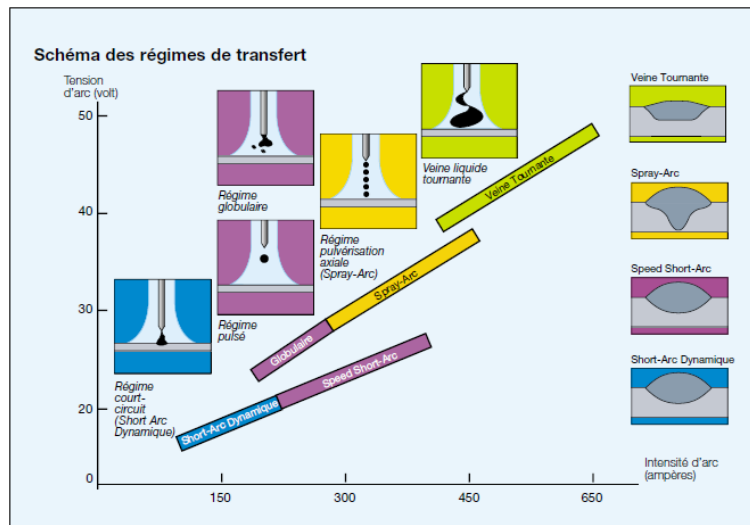


FIGURE 1.7 – Plages de transfert métallique en soudage MIG-MAG [24]

Court-circuit : Pour de faibles énergies d'arc (soit une intensité variant de 50 à 200 A et une tension de 15 à 20 V) le dépôt de métal se fait de manière discontinue en une alternance de temps d'arc et de temps de court-circuit (figure 1.8). Durant le temps d'arc, c'est-à-dire durant la phase où est créé l'arc électrique, une goutte se forme au bout du fil par effet Joule dans la partie terminale et par l'influence de l'arc électrique et grossit jusqu'à venir en contact avec le bain, créant ainsi un court-circuit. Au cours de cette période de court-circuit, le courant augmente rapidement et engendre des forces électromagnétiques faisant apparaître un pincement entre la partie solide et la partie liquide du fil de soudage, ce qui facilite alors le détachement de la goutte. Suite à cela, un arc s'établit à nouveau entre le fil de soudage et la tôle. Un nouveau cycle de formation d'une goutte peut alors recommencer. Dû à la faible énergie de l'arc, ce régime est

appelé "froid". Dans le cadre du soudage en régime de court-circuit, la fréquence des phénomènes varie en fonction des réglages et oscille dans une gamme de 40 à 250 Hz.

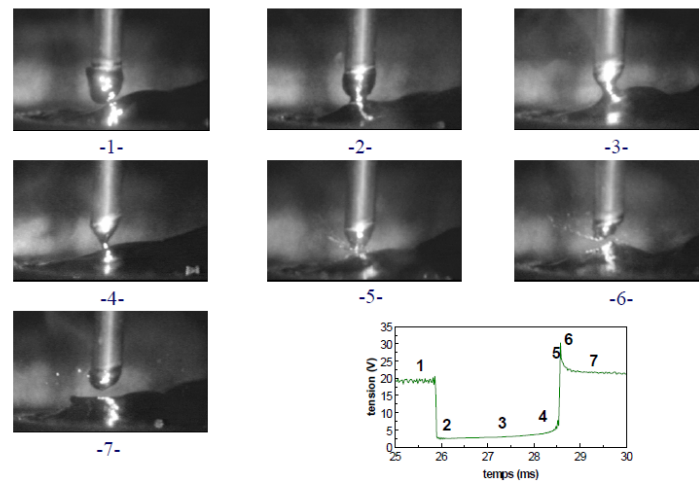


FIGURE 1.8 – Diagramme tension de soudage et les images du transfert pour une période court circuit [21]

Globulaire : Ce régime de soudage (figure 1.9) s'établit pour un niveau d'énergie se situant entre les niveaux d'énergie du régime de court-circuit et du régime par pulvérisation axiale. Ainsi, les gouttes ont une croissance lente, et au contraire du régime de court-circuit, le courant n'est pas suffisamment élevé pour produire un resserrement du col entre la phase liquide et la phase solide et donc un détachement de la goutte. Le transfert se fait par court-circuit lorsque la goutte touche le bain ou lorsque, sous l'effet de la pesanteur, la goutte se détache du fil. La goutte suit alors une trajectoire aléatoire qui n'est pas toujours dans l'axe de l'arc. Ce mode de transfert est instable et provoque de nombreuses projections. La forme des signaux électriques correspondant à ce régime sont ceux du régime par court-circuit, à la différence que la fréquence du phénomène n'est plus régulière. Ce mode de transfert doit être évité au maximum.

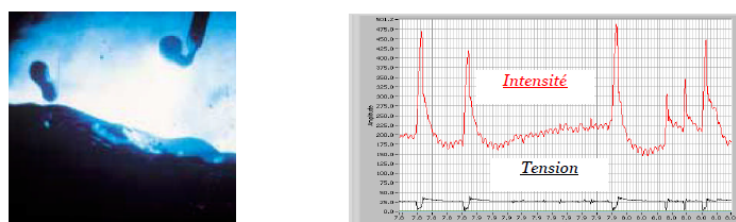


FIGURE 1.9 – Diagramme intensité/tension de soudage et les images du transfert pour le mode globulaire [21]

Pulvérisation axiale : Pour des hautes énergies de soudage, soit une densité de courant supérieure à 250 A.mm^{-2} selon la nature du fil et le gaz de protection, le transfert de métal se produit sous forme de fines gouttelettes dont le diamètre est inférieur à celui du fil (figure 1.10). Les fines gouttelettes sont projetées à grande vitesse dans l'axe du fil. Ce transfert de métal procure un arc stable avec peu de projections et il permet une pénétration et un volume de métal déposé important. Au vu du niveau d'énergie utilisé, ce procédé concerne les épaisseurs supérieures à 5 mm. Les signaux de tension et d'intensité observés entre l'électrode et la tôle sont pour ce régime quasi continus.

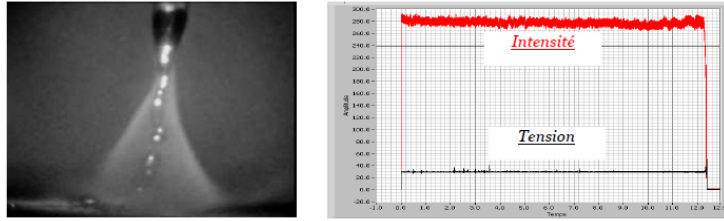


FIGURE 1.10 – Diagramme intensité/tension de soudage et les images du transfert pour le mode spray [21]

Veine tournante : Pour des intensités de l'ordre de 500 A et des tensions de 45 à 50 V, le transfert par pulvérisation axiale est soumis à des forces électromagnétiques importantes. A ce niveau d'énergie, le métal liquide soumis à ces forces effectue un mouvement de rotation dans l'arc (figure 1.11). Au vu de l'énergie apportée par l'arc, ce régime permet une productivité élevée pour des éléments à souder de fortes épaisseurs.

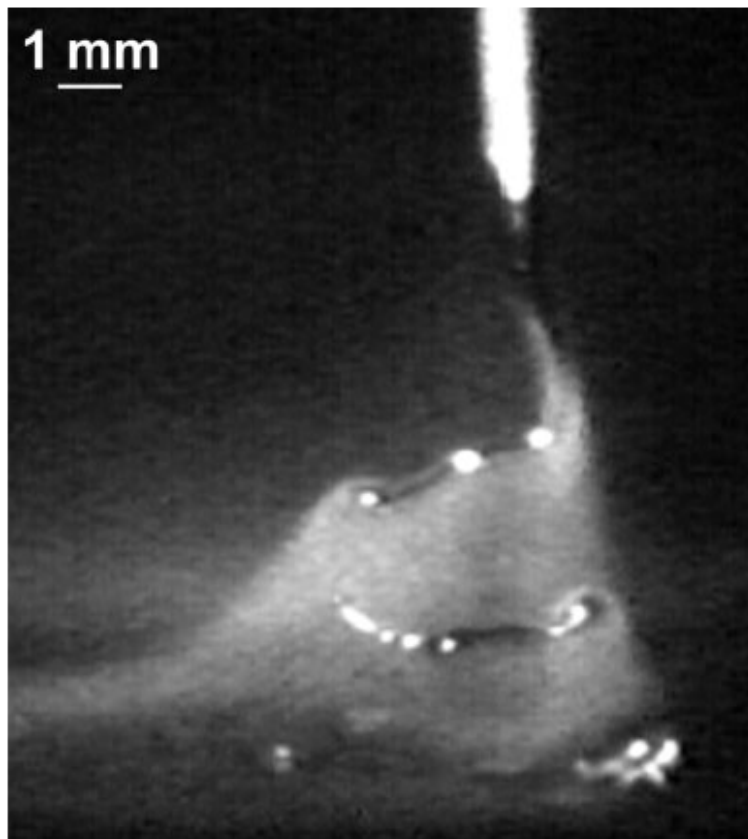


FIGURE 1.11 – Transfert métallique mode veine tournante [26]

Le mode pulsé : Le régime pulsé [27; 28] est réalisé grâce à la superposition de pics d'intensité à un courant de base (forme d'onde créneaux). L'arc est constamment maintenu et il y a libération de gouttelettes de métal d'apport à la suite du pic d'intensité appelé autrement "temps chaud". Pour un bon réglage du procédé, la fréquence de transfert des gouttelettes correspond à celle des créneaux du régime "pulsé". lors des pics d'intensité (figure 1.12). Ce régime de transfert particulier permet de réaliser des cordons avec des contraintes d'épaisseur et de caractéristiques des matériaux qui nécessiteraient l'utilisation d'un régime globulaire. Pour améliorer le transfert

des gouttes d'alliages légers, il y a le "synchro-pulse", qui génère deux créniaux pulsés à des niveaux d'énergie différents.

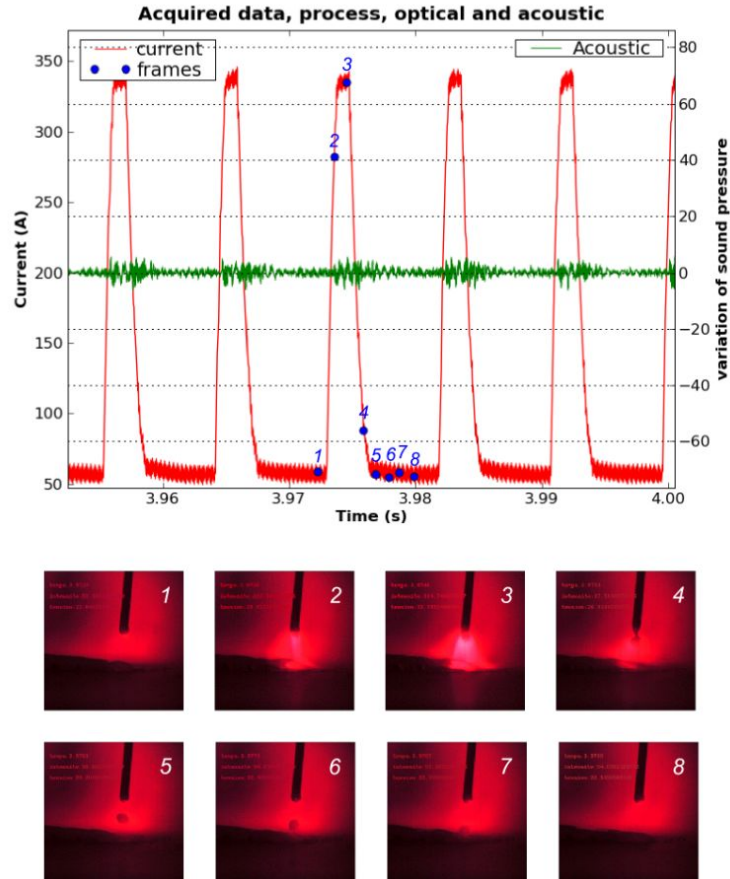


FIGURE 1.12 – Diagramme intensité/tension de soudage et les images du transfert pour une période pulsée [29]

Quelques autres modes : Il existe d'autres modes de transfert. Ils résultent d'une amélioration d'un mode conventionnel.

Les premiers sont issus d'une évolution du transfert par court circuit naturel à celui par court circuit contrôlé. Les procédés proposant ce mode particulier de transfert sont ceux cités à la section 1.2.1.2, comme le **RMD**®, le **STT**®, ou encore le **Cold Arc**®. Pour ces procédés, il s'agit de combiner à la fois les avantages des modes par court circuit et pulsé, qui sont une énergie basse pour moins de distorsions et peu de projections métalliques. Par exemple, un transfert avec la technologie **Cold Arc**® s'effectue de la façon suivante [21] : l'arc initié au bout de l'électrode fusible forme une goutte de métal en fusion. Le fil fusible transporte ensuite cette goutte au bain de soudage (1) (cf. figures 1.13 et 1.14 pour les repères numérotés). A l'approche du court circuit, un faible courant de soudage assure la stabilité de la goutte, la vitesse de fusion est alors inférieure à la vitesse de dévidage du fil. Le bain de fusion et la goutte entre en contact (2) pour former un court-circuit. Un niveau d'intensité constant est conservé un laps de temps, toujours pour conserver cette stabilité et ainsi éviter des projections métalliques. Maintenant est engagé la montée de courant de soudage, et simultanément celle de la tension (3), jusqu'à la détection d'un "col" suffisamment petit afin que l'effet de striction amorcé par les forces électromagnétiques soit conservé par les tensions de surface et l'inertie mécanique malgré la chute du courant (4). A présent, la rupture du pont liquide où le détachement de la goutte peut se produire sans projections (5). L'extrémité de l'électrode est toujours en fusion (6), d'où la nécessité de laisser

un courant équivalent au courant "début CC", assez long pour une formation semi arrondi de cette dernière, et ainsi éviter une fois de plus des projections métalliques. Enfin, le courant de soudage est rétabli (7) pour la formation d'une nouvelle goutte (8).

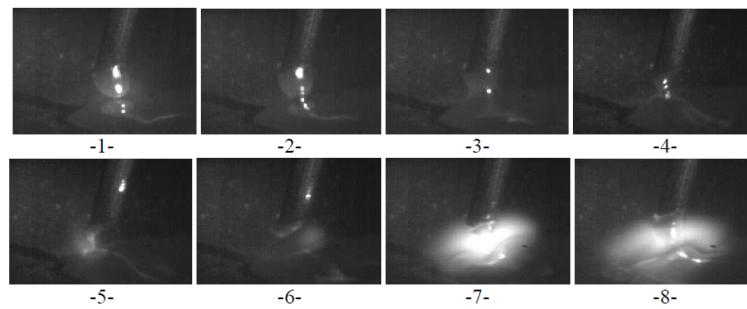


FIGURE 1.13 – Images acquises pour une période en fonctionnement Cold Arc[®] [21]

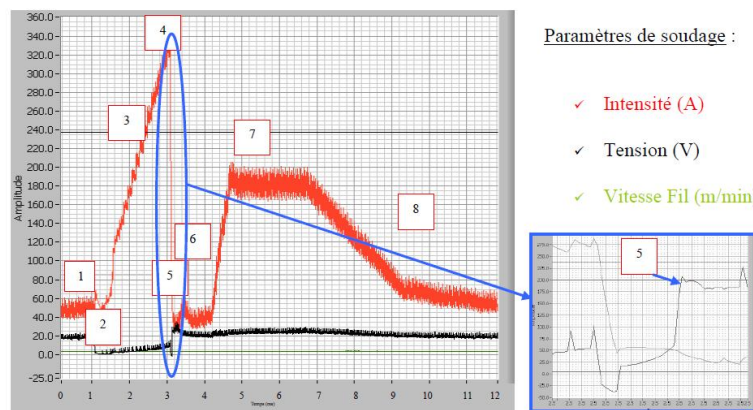


FIGURE 1.14 – Diagramme intensité/tension/Vitesse fil correspondant aux images présentées à la figure 1.13 [21]

Fronius[®] a également son mode de transfert par court-circuit contrôlé mais se distingue par le dévidage du fil d'apport alternatif. En effet, le retrait du fil est utilisé pour amorcer plus efficacement la rupture du pont liquide, autorisant le maintien d'un courant bas et ainsi peu de projections. De plus, selon la version du procédé CMT, il est possible de combiner différents régimes de courant à celui du court circuit contrôlé, comme des pulsations durant les temps d'arc ou un courant alternatif. Ainsi, la version avancée du procédé CMT propose un contrôle fin de l'énergie délivrée par la source de puissance [18], impliquant un accès élargi aux applications industrielles vis-à-vis des procédés conventionnels, comme le soudobrasage hétérogène par l'utilisation de fils d'apport à bas point de fusion et le soudage des tôles minces avec un gain de productivité notable.

1.2.2.4 Mode de protection : flux gazeux pour les procédés à l'arc

Lors des travaux de soudage, les métaux ont tendance à réagir avec l'oxygène et l'azote contenus dans l'air pour former des oxydes et des nitrures. L'oxygène très réactif avec le carbone, tend également à former du monoxyde de carbone. Ces différentes réactions contribuant à faire apparaître de nombreux défauts de soudage, l'opération est effectuée sous protection gazeuse.

Ce gaz a aussi un rôle actif dans les propriétés du cordon qui diffèrent selon sa composition. Aussi, les éléments d'additions peuvent agir en cours de soudage sur les températures et la densité du plasma, les températures du bain de fusion et sur les tensions superficielles aux interfaces Plasma-Bain et en soudage MIG-MAG, Plasma-Gouttelette. Le choix du gaz est donc

très important pour l'assemblage car il contribue à la stabilité de l'arc, au profil de pénétration, à l'angle de mouillage, à la compacité et à la composition chimique du cordon.

Parmi les gaz inertes, nous noterons particulièrement la présence de :

- L'argon (Ar) qui est un gaz inerte monoatomique. Plus lourd que l'air, il a tendance à descendre en sortie de la buse ce qui assure une bonne couverture du bain de fusion.
- L'hélium (He) qui est aussi un gaz inerte à molécule monoatomique. Beaucoup plus léger que l'air, il a tendance à s'élever à la sortie de la buse de soudage. Le débit d'hélium requis pour assurer une bonne couverture du bain de fusion représente pratiquement le double de celui nécessaire avec l'argon.

Dans le cas des gaz actifs :

- Le gaz carbonique (CO_2) est un gaz actif dont la molécule se compose de trois atomes. Un atome d'oxygène peut être libéré pendant le soudage et réagir avec le métal en fusion pour l'oxyder. De plus, le carbone qu'il contient a tendance à s'incorporer au métal en fusion. Ce gaz possède les mêmes caractéristiques que l'argon en ce qui concerne la couverture du bain de fusion. Employé seul en **GMAW**, il entraîne beaucoup de projections. Cependant, on l'utilise fréquemment en mélange avec l'argon pour les aciers à faible teneur en carbone. Pour le soudeur, l'utilisation de gaz 100% CO_2 génère un bain de fusion plus maniable ("plus pâteux") notamment en position verticale montante, avec des tensions d'arc plus importantes. Le CO_2 a pour autre avantage d'être beaucoup moins coûteux que l'argon.
- L'oxygène : bien que l'oxygène (O_2) ne soit pas utilisé seul en soudage à l'arc, il fait partie des mélanges. Il s'agit évidemment d'un gaz actif oxydant les métaux en fusion.
- L'hydrogène (H_2) n'oxyde pas le métal en fusion comme l'oxygène. Bien qu'il soit deux fois plus léger que l'hélium, son influence est peu marquée sur la couverture du bain de fusion car il est rarement employé seul.

L'utilisation d'un gaz seul est très rare car il ne possède généralement pas toutes les caractéristiques voulues. Les soudeurs font donc appel à des mélanges avec différentes proportions de gaz. L'ensemble des mélanges utilisés pour le soudage à l'arc est constitué à partir d'Argon afin de garder ses caractéristiques (amorçage et maintien de l'arc facile, gaz inerte).

1.2.2.5 Effet des paramètres de soudage à l'arc

Le courant (I ou vitesse de fil V_{fil} pour le **GMAW**) et la vitesse de soudage (V_s) auront une influence directe sur la pénétration de la soudure, le rendement du procédé et donc l'énergie transmise à la pièce. La tension (U) est directement liée à la longueur d'arc (ou encore hauteur d'arc, quasiment dans des proportions linéaires, figure 1.15). La largeur de la soudure dépend de la longueur d'arc. Elle diminue avec la tension de soudage pour une énergie délivrée constante.

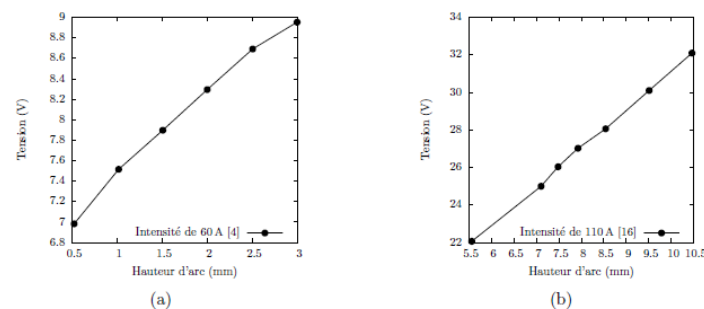


FIGURE 1.15 – Relation entre la hauteur d'arc (mm) et la tension (V) obtenues par Binard et al. [30] (a) et Evans et al. [31] (b) (figure de [32])

Les gaz de protection employés auront des effets sur la géométrie du bain de fusion (rapport Pénétration/Largeur), qui se traduisent par des potentiels d'ionisation différents (5 à 25 volts entre l'argon et l'hélium). Enfin pour le procédé TIG, l'angle d'affûtage de l'électrode aura une influence non négligeable sur la forme de l'arc, et donc sur la géométrie de la zone fondue. Comme on peut le voir sur la figure 1.16, pour tout autre paramètre constant par ailleurs, plus cet angle est important, plus la tension du procédé est basse, et donc, plus la puissance totale l'est.

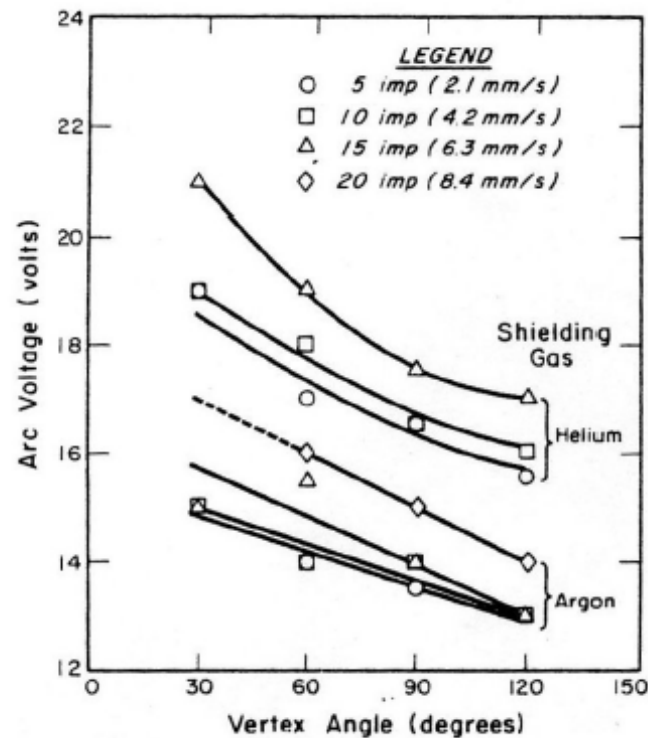


FIGURE 1.16 – Variation de la tension de l'arc (V) en fonction de l'angle d'affûtage de l'électrode ($^{\circ}$), du gaz utilisé, et de la vitesse de soudage ($mm.min^{-1}$) pour une hauteur d'arc de 2,54 mm, une intensité de 175A et une pièce en acier HY – 80 [33]

On remarque l'influence couplée de l'ensemble de ces paramètres sur la soudure, et donc la difficulté pour l'opérateur de paramétrer son poste à souder.

1.2.3 Solutions industrielles pour le contrôle du procédé

Les procédés étant de plus en plus automatisés, il est intéressant de pouvoir contrôler l'opération de soudage en temps réel afin de réajuster les paramètres si nécessaire [34]. Les objectifs sont de garantir une qualité finale de l'assemblage, d'assurer la stabilité du procédé et de permettre aux opérateurs travaillant dans des contextes opératoires dangereux ou inaccessibles un contrôle à distance de l'opération.

A ce jour, il existe quelques méthodes "académiques" pour le suivi de cordons soudés [35; 36; 37; 38] comme celles basées sur l'imagerie (géométrie en surface), les ultrasons (pénétration), ou encore par le biais du traitement numérique du signal tension d'arc et pression acoustique (stabilité du procédé).

Les solutions appliquées industriellement sont par exemple le WeldQAS[®] [39] ou le ArcAgent d'ImpactWelding[®] [40]. Ils utilisent des centrales d'acquisition embarquées pour l'enregistrement et le traitement automatisé des paramètres procédé comme l'intensité, la tension, la vitesse fil et le débit de gaz de protection. La solution WeldQAS[®] propose en option le Thermo-Profil-

Scanner pour la détection de défauts de souffres, caniveaux, en scannant la soudure (capteur positionné derrière la torche). Enfin, des caméras de technologie CCD sont utilisées pour le suivi de joint en cours de soudage [18].

1.3 L'opération de soudage : un milieu sous sollicitations extrêmes

La veille technologique présentée à la section précédente expose l'intérêt du contrôle fin des sources de puissance pour assurer la stabilité d'un arc établi entre les électrodes, et dans certains cas, pour un transfert de matière d'apport efficace. L'amélioration de ces processus implique une compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors des opérations de soudage à l'arc. L'objectif de cette partie est de mettre en place les phénomènes physiques induits.

Les phénomènes physiques mis en jeu dans le procédé à l'arc sont nombreux et complexes comme peut l'illustrer la figure 1.17 sur laquelle on a représenté ceux qui pour la plupart sont pris en compte dans les modélisations récentes [32; 41; 42; 43; 44].

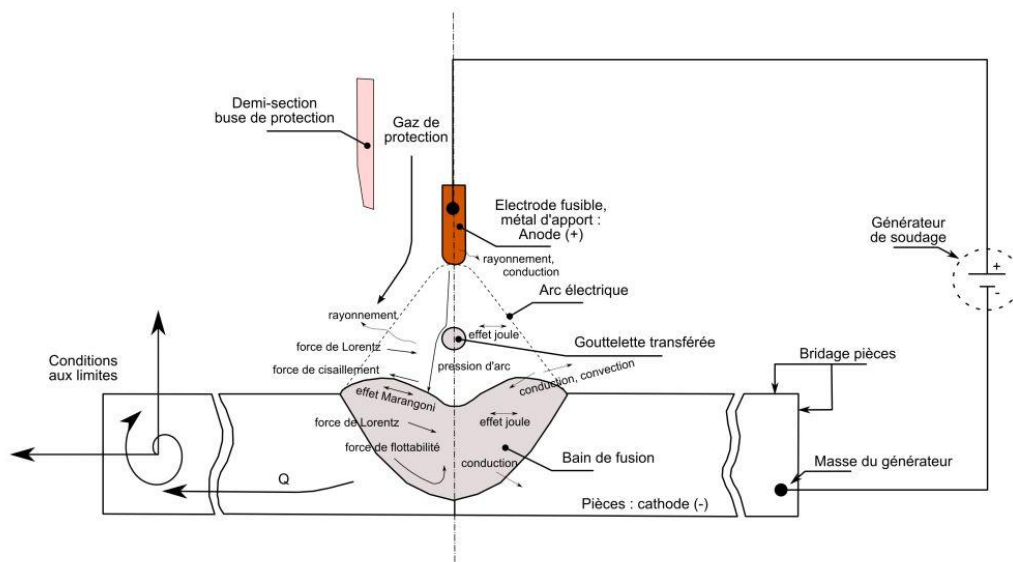


FIGURE 1.17 – Physique de l'arc, du transfert et du bain

Ils déterminent le mouvement et la distribution de constituants et la température dans l'arc électrique et le bain de fusion. Ils s'inscrivent dans le modèle de la magnétohydrodynamique. Cette modélisation est construite à partir des équations de bilan de masse (Eq.1.1), de quantité de mouvement (Eq.1.2), d'énergie (Eq.1.3) et des équations de l'électromagnétisme (Equations 1.4, 1.5, 1.6, 1.7) couplées entre elles par l'intermédiaire de termes source ou de certaines lois constitutives. Les conditions aux limites entre domaines jouent un rôle important. On rappellera au cours de la description des phénomènes physiques le couplage qu'il existe entre ces phénomènes et les domaines. A titre d'exemple, on peut citer l'échange par convection qu'il y a le long de l'interface entre le bain liquide et le plasma d'arc.

Les équations de conservation présentées sont écrites dans une formulation eulérienne sur un domaine de contrôle V et dont les frontières seront notés ∂V ou S . Dans la modélisation des opérations de soudages, ces volumes de contrôles et frontières sont parfois évolutifs.

Les formes locales des équations s'écrivent alors :

1. Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = 0 \quad (1.1)$$

2. Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{u} - \nabla \cdot \bar{\bar{\sigma}} = \mathbf{F}_{domaine} \quad (1.2)$$

3. Equation de conservation de l'énergie :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p \right) - \bar{\bar{\tau}} : \nabla \mathbf{u} = S_{domaine} \quad (1.3)$$

4. Les équations électromagnétiques classiques de Maxwell peuvent s'écrire :

(a) Equation de Maxwell-Faraday :

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

(b) Equation de Maxwell-Gauss :

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = q_{totale} \quad (1.5)$$

(c) Equation de Maxwell-Ampère :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.6)$$

(d) Equation de conservation du flux magnétique :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.7)$$

Dans certaines de ces équations, des temps caractéristiques peuvent apparaître permettant alors d'apprécier la dynamique d'un phénomène physique et ainsi appréhender d'en les plus importants. L'ensemble de ces équations fait apparaître la diversité des champs mise en jeu dans un domaine tel que l'arc. La résolution complète de ces équations demandent des méthodes lourdes à mettre en œuvre. Souvent, on retrouve dans la littérature des modèles simplifiés permettant de répondre à une problématique spécifique.

1.3.1 L'arc électrique en soudage

Dans cette section, les phénomènes physiques et les moyens de caractérisation de l'arc électrique sont présentées.

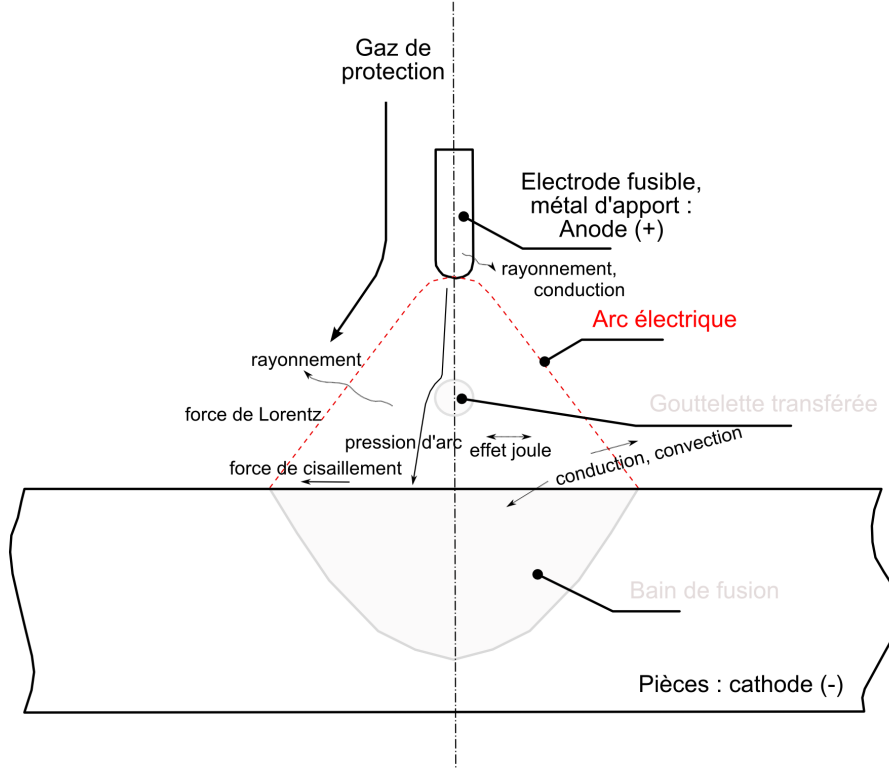


FIGURE 1.18 – Physique de l'arc

1.3.1.1 Plasma et apport d'énergie

La différence de potentiel entre la pièce à souder et l'électrode crée un courant électrique, qui engendre un champ magnétique auto-induit [45; 46; 47]. Ce champ magnétique crée à son tour des forces de Lorentz (Eq.1.8) qui vont entraîner le gaz de protection vers la surface de la pièce. Ce conducteur gazeux présente une résistance électrique. L'énergie produite par effet Joule (Eq.1.9), due au passage du courant, va garder le gaz dans un état ionisé (plasma), à haute température. Le plasma est constitué d'électrons, de particules lourdes (ions, atomes de gaz de protection), d'éléments métalliques vaporisés, possédant une forte conductivité électrique. Le plasma agit donc à la fois comme une source de chaleur (Eq.1.10) à la surface de la cathode et comme une source de courant non uniforme à travers le métal de base. La force de Lorentz $\mathbf{F}_{Lorentz}$ peut être exprimée par la relation suivante :

$$\mathbf{F}_{Lorentz} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} + e(n_i - n_e)\mathbf{E} \quad (1.8)$$

Où n_i et n_e sont respectivement les densités ionique et électronique, $\mathbf{B}$ l'induction magnétique, $\mathbf{j}$ la densité de courant, $\mathbf{E}$ le champ électrique et e la charge élémentaire.

L'effet Joule peut être exprimé dans le plasma par la relation suivante [32] :

$$S_{Joule} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \quad (1.9)$$

Dans la colonne d'arc le flux de chaleur comprend les phénomènes de conduction et de transport d'enthalpie par les électrons. Ceci conduit à l'équation suivante [32] :

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \nabla T - \frac{5 \cdot k_b}{2 \cdot e} \mathbf{j} T \quad (1.10)$$

Où K_b est la constante de Boltzmann, e la charge d'un électron, $\mathbf{j}$ la densité de courant. Le premier terme $\lambda \nabla T$ représente le flux de conduction thermique. Le terme $(5.k_b/2.e)\mathbf{j}T$ représente le transfert d'enthalpie par les électrons.

1.3.1.2 Transport d'énergie dans la colonne d'arc

La puissance totale (Q) dépensée dans l'arc est égale au produit de la chute de tension (U) existant entre l'électrode et la pièce à souder et de l'intensité (I) circulant dans l'arc (Eq.1.11) [3].

$$Q = UI \quad (1.11)$$

Dans une représentation simplifiée et monodimensionnelle de l'arc, on distingue trois régions (figure 1.19) en fonction de la façon dont se répartit la chute de tension (U) :

1. La colonne d'arc qui occupe la majorité de l'espace entre les électrodes (cathode-anode) représente la hauteur d'arc. La hauteur d'arc est donc un paramètre très important en soudage à l'arc, puisqu'il conditionne la chute de tension entre l'électrode et la pièce, et donc l'énergie transférée. A intensité constante, la tension peut être reliée quasi linéairement à la hauteur d'arc [8] ;
2. La zone cathodique (épaisseur de l'ordre du micron) qui peut être considérée comme une source d'émission d'électrons où se fabrique la majeure partie de l'intensité du courant I qui transite à l'anode en traversant la colonne d'arc centrale et la zone anodique ;
3. La zone anodique (épaisseur analogue), de laquelle sont émis les ions qui participent eux aussi au courant de l'arc. C'est dans la zone anodique d'épaisseur comparable à la zone cathodique que le flux d'électrons va pénétrer dans l'anode avec une distribution de densité de courant qui va déterminer la géométrie du bain de fusion. Au transfert de chaleur est aussi amené un transfert de quantité de mouvement défini par la pression de l'arc appliquée sur la surface libre du bain.

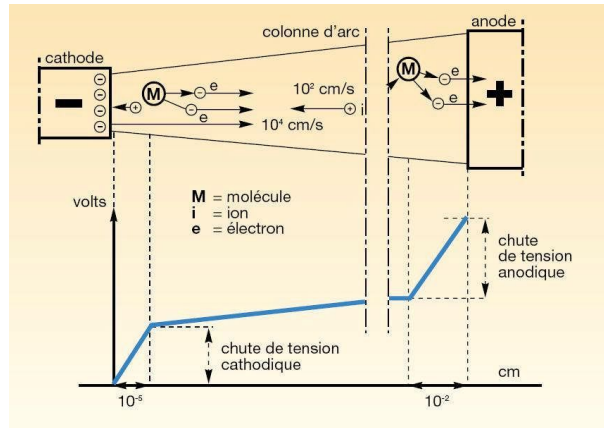


FIGURE 1.19 – Structure de l'arc électrique [16]

1.3.1.3 Rayonnement de l'arc

Le rayonnement peut être pris en compte dans le bilan énergétique par la relation suivante :

$$S_{\text{rayonnement}} = 4\pi\epsilon_n \quad (1.12)$$

Où ϵ_n représente un coefficient d'émission nette qui dépend de la nature physico-chimique du plasma. Le diagnostic de l'arc par spectroscopie optique d'émission, permet une étude non-intrusive du procédé. C'est par ailleurs le seul moyen de mesurer les températures très élevées

rencontrées dans l'arc ($> 10000K$), la pyrométrie étant limitée pour une précision acceptable, à quelques milliers de degrés [48].

Tous les résultats de ces études spectroscopiques montrent divers intérêts tels que, la possibilité de détecter des défauts en temps réel (monitoring), nous donner des informations sur les températures dans l'arc (alimentant les modèles d'arc) et exposer les raies caractéristiques d'émission pour les arcs électriques qui comme nous le verrons dans le chapitre suivant constituent des informations capitales pour l'élaboration de techniques optiques pour l'observation du bain de fusion en cours de soudage [36]. Il est intéressant de remarquer que nous trouvons également les spectres électroniques pour les arc MIG-MAG (figure 1.20), d'ailleurs ces publications font apparaître l'intérêt de ce type de caractérisation expérimentale pour l'étude de l'influence du gaz de protection dans l'arc électrique. En effet, ces spectres électriques varient selon la nature du métal de base (et celui d'apport quand il est utilisé), la nature du gaz de protection et de l'énergie à la source.

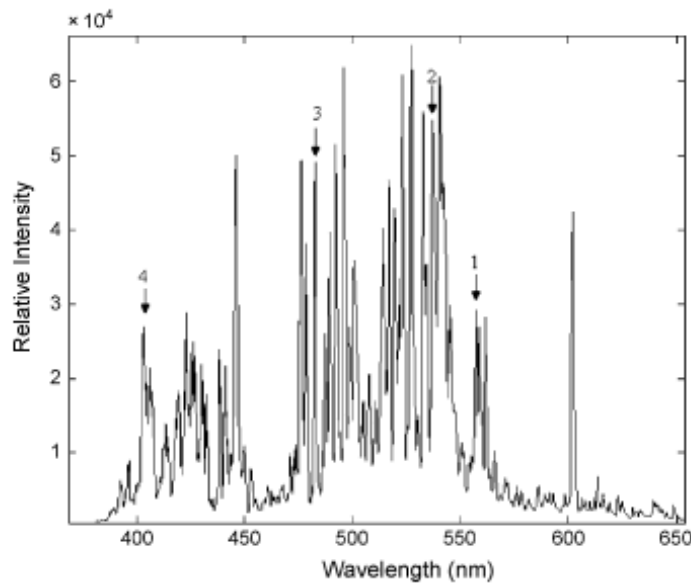


FIGURE 1.20 – Spectre émis avec le procédé GMAW sur une éprouvette en SAE 1020 [36]. (1) Fe I 561.564, (2) Fe II 537.149, (3) Mn I 482.352 et (4) Mn II 403.306

1.3.1.4 Caractérisation de la pression de l'arc

Des études [49; 50; 51] sur la pression de l'arc sur le bain de fusion en soudage TIG tentent à montrer que celle-ci est à l'origine de l'apparition de défauts, comme le humping ou la géométrie de la zone fondue ("doigt de gant", [52]) quand la déformation de la surface libre du bain est très marquée. Afin de s'affranchir de la modélisation magnétohydrodynamique du plasma, la pression d'arc sur le bain peut être modélisée par :

$$p_{arc}(r) = \frac{P}{2\pi\sigma_p^2} e^{\left(\frac{-r^2}{2\sigma_p^2}\right)} \quad (1.13)$$

Où P est la force totale et σ_p un paramètre de distribution de pression sous forme de gaussienne.

M. L. Lin [50] a utilisé un capteur de pression, qui lui a permis de mesurer la pression de l'arc électrique, c'est à dire la résultante de la force de l'arc, de la pression du gaz de protection, et des forces de Lorentz. Sur la figure 1.21 nous pouvons observer le dispositif expérimental utilisé.

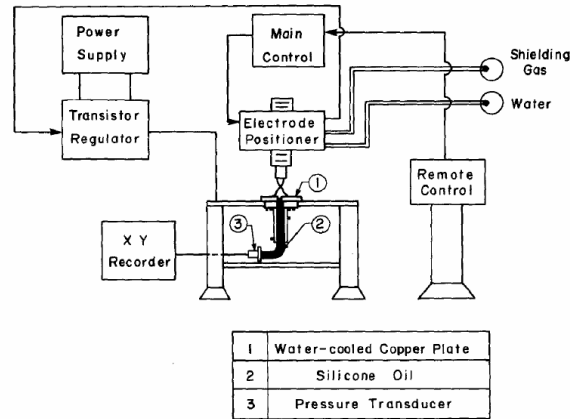


FIGURE 1.21 – Dispositif expérimental pour mesurer la pression de l’arc [53]

L’ordre de grandeur de la force totale mesurée pour 200 A est de 0.05 N. Aussi, il est montré que la pression d’arc croît linéairement avec le courant. Les résultats ont montré que dans des conditions standards de fonctionnement, la profondeur de la dépression de la surface libre du bain reste faible (moins de 1 mm), mais lorsque que nous nous situons dans les limites de fonctionnement (forte intensité), cette profondeur augmente remarquablement. Dans ces conditions extrêmes de soudage, nous n’obtenons pas une bonne répétabilité des résultats, ce qui traduit une forte instabilité de la surface de dépression. Cette dernière ne peut être expliquée uniquement par la pression de l’arc [53].

1.3.1.5 Caractérisation globale de l’arc

L’arc électrique est un élément dynamique qui possède des propriétés électriques variables suivant la fréquence du signal. Une méthode pour examiner les propriétés électriques de l’arc est le traitement numérique du signal de grandeurs globales (tension U , intensité I). Cette méthode a été exploré par D. Sorensen [54]. Cet outil permet donc un contrôle qualité en temps réel de l’opération de soudage.

R. J. Renwick et R. W. Richardson utilisent l’arc électrique comme une image de la hauteur d’arc, c’est-à-dire qu’une distance précise entre l’électrode et la pièce à souder représente une tension donnée (en Volts). Le traitement numérique du signal de la tension de soudage permet la caractérisation des oscillations du bain fondu en cours de soudage. Ces oscillations sont représentatives de la qualité de l’opération de soudage [55].

1.3.1.6 Modèles numériques : Arc

Dans la littérature nous trouvons de nombreux modèles d’arc [56; 57; 58]. Ces modèles diffèrent par les hypothèses émises et les phénomènes physiques choisis. Les principales caractéristiques des modèles d’arc les plus utilisés à ce jour sont :

- le plasma est considéré comme étant à l’équilibre thermodynamique local ;
- l’existence d’un régime stationnaire est supposée ;
- le système modélisé est supposé être axisymétrique ;
- le régime de l’écoulement du plasma est supposé laminaire ;
- la présence de vapeur métallique négligée ;
- la diffusion ambipolaire n’est pas prise en compte.

J.Hu et H.L.Tsai [47] étudient l’influence de la forme du courant en GMAW sur le détachement des gouttes et le bain de métal fondu. Leur modèle inclut les électrodes, le plasma, la formation, le détachement et le parcours des gouttes de métal. Pour la modélisation du plasma, la gaine

anodique est calculée à part, en tant que plasma non-collisionnel. La distribution des forces électromagnétiques et la température dans la goutte sont calculées au cours du temps, jusqu'au détachement et après celui-ci. Ils développent ensuite en deux parties un modèle complet de l'arc, en considérant une symétrie axiale pour un domaine de calcul cylindrique. Le pas de la grille de calcul est variable, plus fin au niveau des électrodes. Les conditions de soudage étudiées sont un courant de 220 A sous argon pour une électrode de 1,6 mm de diamètre. La température, le champ électrique, les lignes de courant, les forces électromagnétiques (figure 1.22) et la pression de l'arc sont calculés pour un temps de soudage de 1 s. Le modèle prend en compte le détachement, la chute et l'impact des gouttes sur le bain fondu. La température maximale calculée est de 19300 K sous la goutte, sur l'axe.

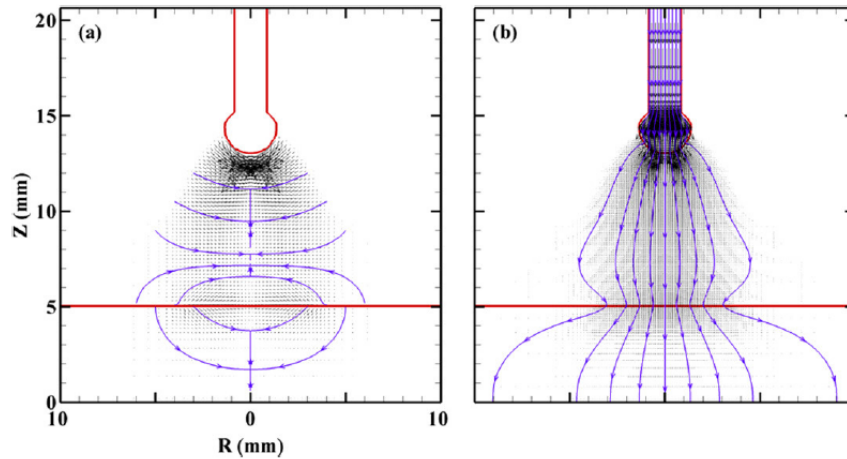


FIGURE 1.22 – Distributions des lignes de courant (a) et des forces électromagnétique (b) [47]

L'enrichissement de ces modèles numériques, pour une amélioration de la compréhension des effets du courant sur le détachement et le transfert de la gouttelette, pourrait passer par l'acquisition de données expérimentales en cours de soudage, comme des données géométriques sur le ménisque avant le détachement de la goutte à l'extrémité de l'électrode ou sur la gouttelette en vol libre. De plus, il semble intéressant d'associer à ces quantités dimensionnelles, les conditions opératoires telles que les paramètres procédé, la composition du gaz de protection et le diamètre de l'électrode. Enfin, pour affiner le calage, des températures de l'arc obtenues par spectroscopie optique d'émission [36] peuvent être utilisées. Quelques comparaisons sont fournies par la littérature [59], mais il n'existe pas de comparaison systématique.

1.3.2 Transferts métalliques en GMAW

Dans le cas des électrodes fusibles en soudage à l'arc comme en Gas Metal Arc Welding, nous observons la fusion de cette électrode (donc aussi métal d'apport) souvent sous forme de gouttes dans le bain de fusion. On définit ce phénomène comme un transfert métallique de l'électrode fusible. Ce transfert se met en place à travers l'arc électrique et participe à l'apport calorifique de la pièce soudée. De plus, ce transfert produit des projections métalliques provenant de l'électrode fusible, projections qui s'orientent en parties hors du bain de fusion de manière aléatoire.

Les critères qui font des procédés à électrodes fusibles des procédés populaires, sont un meilleur rendement, et un taux de dépôt important en comparaison avec les autres procédés de soudage à l'arc [3].

Après une rapide observation du procédé MIG pour différents modes opératoires, nous constatons que le mode de transfert métallique à travers l'arc électrique diffère suivant les paramètres

de soudage. Les modes de transferts dépendent également de la nature du métal de base, mais aussi de l'électrode (métal d'apport), de la composition du gaz de protection ($Ar + CO_2$ ou He etc). La manière dont est transféré le métal dans le bain de fusion a des effets sur la performance et la maniabilité du procédé. Ces effets comptent aussi dans l'efficacité du procédé dans différentes positions de soudage (à plat bord à bord, verticale montante, etc), la pénétration, le mouillage de la soudure, le taux de dépôt et la chaleur transmise à la pièce, la dynamique du bain de fusion, et le taux de projections métalliques (hors bain de fusion) [5].

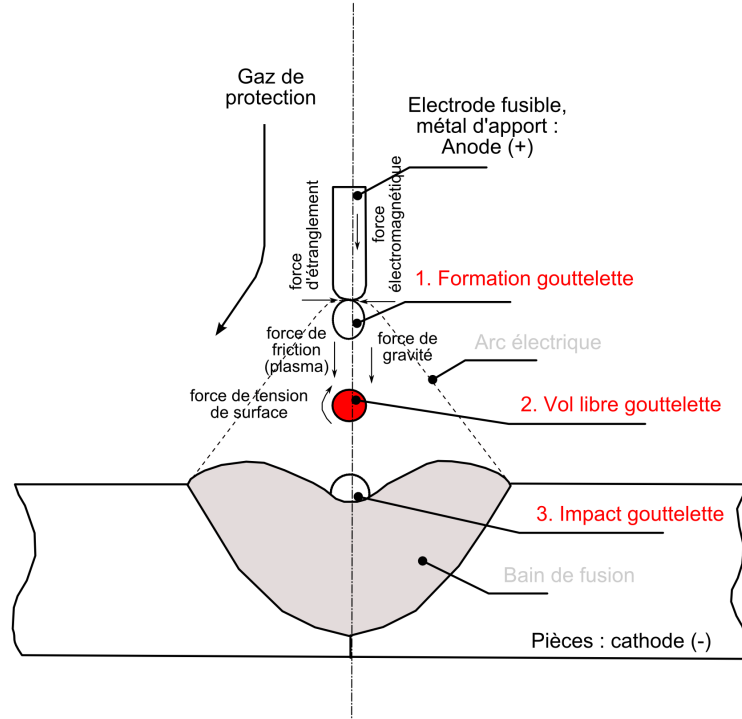


FIGURE 1.23 – Physique du transfert métallique en GMAW

La compréhension de l'apparition et de la nature du transfert métallique dans l'arc électrique requiert de nombreux mécanismes physiques. A ce jour, bien que les théories soient riches, elles ne peuvent l'expliquer que partiellement. La température de l'arc est élevée, et la dynamique des transferts métalliques est importante. Parce qu'il est difficile d'affirmer quel processus physique gouverne le procédé MIG précisément, les théories actuelles retiennent majoritairement les mécanismes suivant [60] :

1. la force générée par le flux du gaz de protection (Eq.1.14) ;

$$F_{dg} = \frac{C_d S \rho_g v_g^2}{2} \quad (1.14)$$

Où C_d représente le coefficient de frottement, S la surface de la goutte, ρ_g la densité du gaz et v_g la vitesse du gaz.

2. la gravité (Eq.1.15) ;

$$F_g = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (1.15)$$

3. l'attraction électrostatique entre l'électrode et la pièce ;

4. le pinch effect (Eq.1.16) résultant du champ de forces électromagnétiques au bout de l'électrode ;

$$F_{pinch} = \gamma \left(\frac{1}{r - \partial R} + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \partial R \right) \quad (1.16)$$

Où γ représente les tensions de surface de la goutte liquide, λ la longueur d'onde de perturbation et ∂R la variation du rayon de la goutte jusqu'à la rupture du pont liquide.

5. les lignes de courant intenses, qui génèrent des évaporations explosives entre le bain et l'électrode ;
6. les divergences des lignes de courant autour de la goutte ;
7. les effets de friction du plasma (Eq.1.17) ;

$$F_{dp} = \frac{C_d S \rho_p v_p^2}{2} \quad (1.17)$$

Où ρ_p représente la densité du plasma et v_p la vitesse du plasma.

8. les effets de tension superficielle entre la goutte et le bain de fusion (Eq.1.18).

$$F_\gamma = 2 \pi d_{fil} \gamma f \quad (1.18)$$

Où d_{fil} est le diamètre du fil d'apport et γ la tension de surface de la goutte en fusion.

C'est par la combinaison de ces mécanismes physiques que des modèles sont proposés expliquant le détachement de la goutte à l'extrémité de l'électrode qui est responsable du mode de transfert de cette gouttelette dans le bain de fusion (Définition des modes de transfert métallique à la section 1.2.2.3).

1.3.2.1 Caractérisation expérimentale des transferts

Dans la littérature nous trouvons quelques exemples de méthodes de mesures pour les transferts métalliques en MIG-MAG. Le principal outil utilisé est une caméra rapide associé à différentes techniques (ombroscopie, réflexion spéculaire) pour filtrer l'arc électrique sur les images afin de visualiser le métal d'apport qui transfère de l'électrode vers le bain de fusion. Ces méthodes optiques dédiées au soudage seront décrites dans le chapitre 2.

L'analyse des images acquises pour l'étude des transferts se fait généralement directement à partir des données brutes. On extrait ainsi manuellement les informations pertinentes comme la vitesse d'une goutte en vol libre, sa taille, etc [61]. D'autres auteurs utilisent des méthodes de détection automatique des contours des gouttelettes. Ils ont développé des outils métrologiques numériques. Nordbruch [62] utilise ce type de méthode pour l'analyse expérimentale et l'optimisation du procédé P-GMAW (figure 1.24) alors que Planckaert [63] l'emploie pour l'enrichissement d'un modèle numérique MIG-MAG en mode short-arc (figure 1.25).

K. Yamazaki et al ont travaillé sur une méthode utilisant deux pyromètres combinés à une caméra rapide (2 longueurs d'ondes 950 et 980 nm) afin de déterminer le champ de température d'une gouttelette en cours de transfert (pulsé) à travers l'arc électrique [64]. Un résultat obtenu pour une opération de soudage MAG (330 A) est présenté à la figure 1.26.

Y.S. Kim et T.W. Eagar [65] utilise une balance afin de déterminer le taux de transfert (en régime pulsé) de l'électrode dans le bain de fusion, et une acquisition vidéo par ombroscopie pour mesurer sur les images la taille des gouttes transférées et contrôler la qualité du transfert. L'objectif est de constituer une base de données expérimentales afin d'alimenter leur modèle ; le but final du modèle et de leur étude en général est de prédire le bon paramétrage du procédé GMAW pour assurer une goutte transférée par pulse. Une étude de J. Soderstrom et de P.F. Mendez

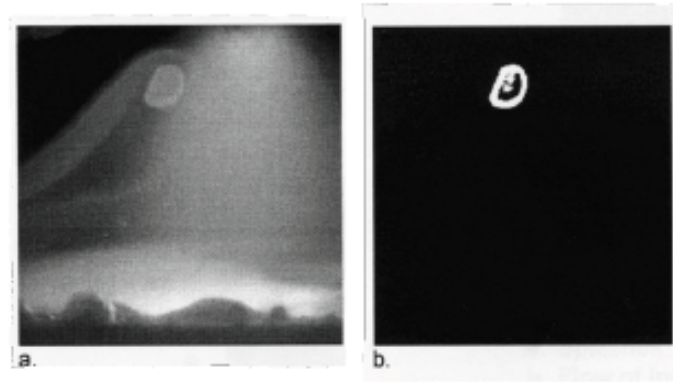


FIGURE 1.24 – a) image brute du transfert d'une goutte dans un arc MIG, b) image traitée avec détection de la goutte [62]

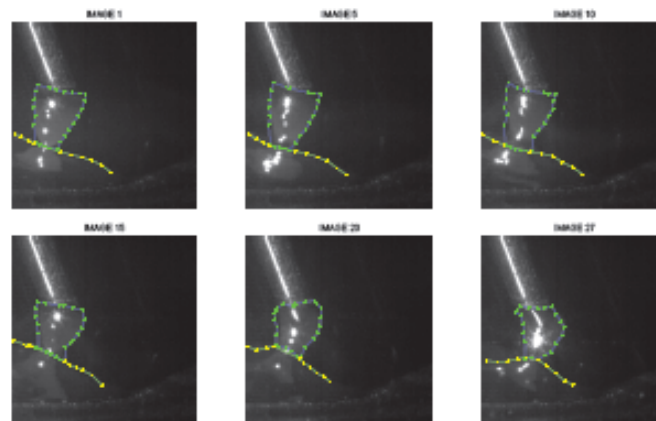


FIGURE 1.25 – Détection de contours durant la phase de court circuit [63]

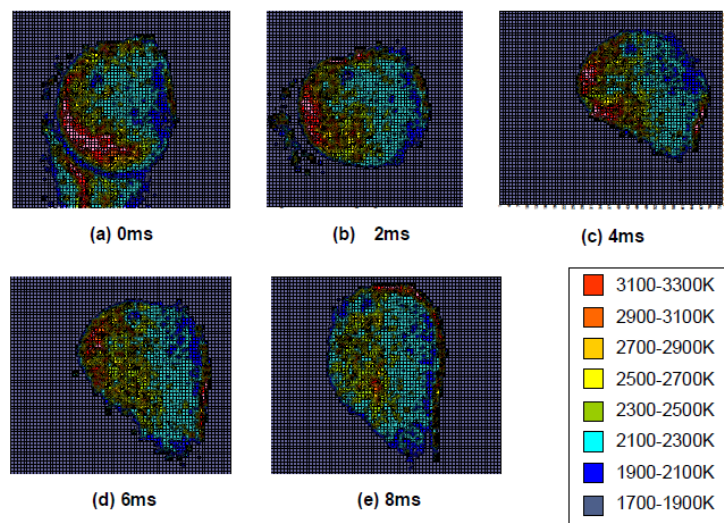


FIGURE 1.26 – Champ de température d'une gouttelette dans un arc MAG (330A) [64]

[6] montre l'influence du diamètre du métal d'apport sur la taille des gouttes transférées. Pour en extraire une tendance, ils ont choisi de procéder à une acquisition des paramètres de soudage associée à de l'imagerie par ombroscopie. Il a été souligné que le diamètre des gouttellettes pour un transfert par pulvérisation axiale ne décroît pas proportionnellement avec le diamètre de fil. Ces études se justifient du fait du nombre conséquent de paramètres opératoires entrant en jeu pour le procédé MIG-MAG. Sachant que chacun des paramètres a une influence sur l'apparition de tel ou tel transfert, l'idée de vouloir modéliser ce procédé demande une base de données très importante.

1.3.2.2 Modèles numériques : transfert métallique

Il existe de nombreux travaux traitant spécifiquement de la modélisation des transferts métalliques [59; 66; 67]. L.A.Jones, T.W.Eagar et J.H.Hang [66; 68] modélisent le détachement des gouttes sous l'effet des forces magnétiques. Leur intensité augmente fortement lors du détachement. Les forces sont calculées à partir de la géométrie de la goutte et appliquées au centre de gravité. La nouvelle position et la nouvelle forme de la goutte sont calculées à chaque étape du calcul. Trois cas sont étudiés : la croissance d'une goutte avec et sans étranglement, et la traversée du plasma par une goutte détachée. L'effet du plasma sur les gouttes en vol est ensuite étudié plus en détail. Les gouttes sont modélisées par des ellipsoïdes axisymétriques. Les simulations ont été faites en courant constant et pulsé. En courant constant, la valeur de la tension de surface doit être réduite pour que le modèle soit correct. Pour justifier ceci, les auteurs mettent en avant l'effet d'une force radiale, qui n'était pas prise en compte dans le modèle : des mouvements de matière dans la goutte se développent et annulent la composante rotationnelle de la force magnétique, qui est donc moins efficace pour détacher les gouttes.

J.Hu et H.L.Tsai [67] étudient la formation de la goutte et son transfert dans l'arc, ainsi que les distributions de température, de potentiel électrique, de vitesse, de courant et des forces électromagnétiques. Le courant est déterminé à partir du couplage entre le plasma et le métal. La température maximale calculée à sa surface est de 2936 K (figure 1.27).

Les températures de la gouttelette acquises par pyrométrie [64] sont une information utile pour le calage du modèle transfert. Les résultats expérimentaux de [64] sont proches des températures calculées par [67] (De l'ordre de 3000 K). Il apparaît aussi l'intérêt pour les modèles de transfert métallique, de caractériser expérimentalement la géométrie [63] et le centre d'inertie de la gouttelette au cours de son évolution entre l'électrode et le bain de fusion. Ainsi, on pourrait introduire dans les modèles numériques l'évolution de sa géométrie, sa trajectoire et sa vitesse en chaque instant de son vol libre jusqu'à son impact dans le bain de fusion.

1.3.3 Mouvements de convection dans le bain fondu

Le bain de fusion créé lors du soudage à l'arc (éventuellement alimenté par un apport de matière) est le siège de processus thermophysiques complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants (figure 1.28). Ces mouvements de convection du métal liquide influencent de façon importante les transferts de chaleur et la forme du cordon. La convection du métal liquide dans le bain fondu résulte de plusieurs phénomènes, qui n'ont pas tous la même importance [8].

1.3.3.1 Force de tension de surface, effet Marangoni

La tension du liquide à la surface du bain se caractérise par un accroissement de pression du côté de la concavité [69; 70]. Un gradient de tension superficielle γ apparaît sur la surface libre du liquide, qui peut être du à la fois au gradient de température et au gradient de concentration en espèces chimiques. Ce gradient de tension de surface engendre d'importants mouvements de

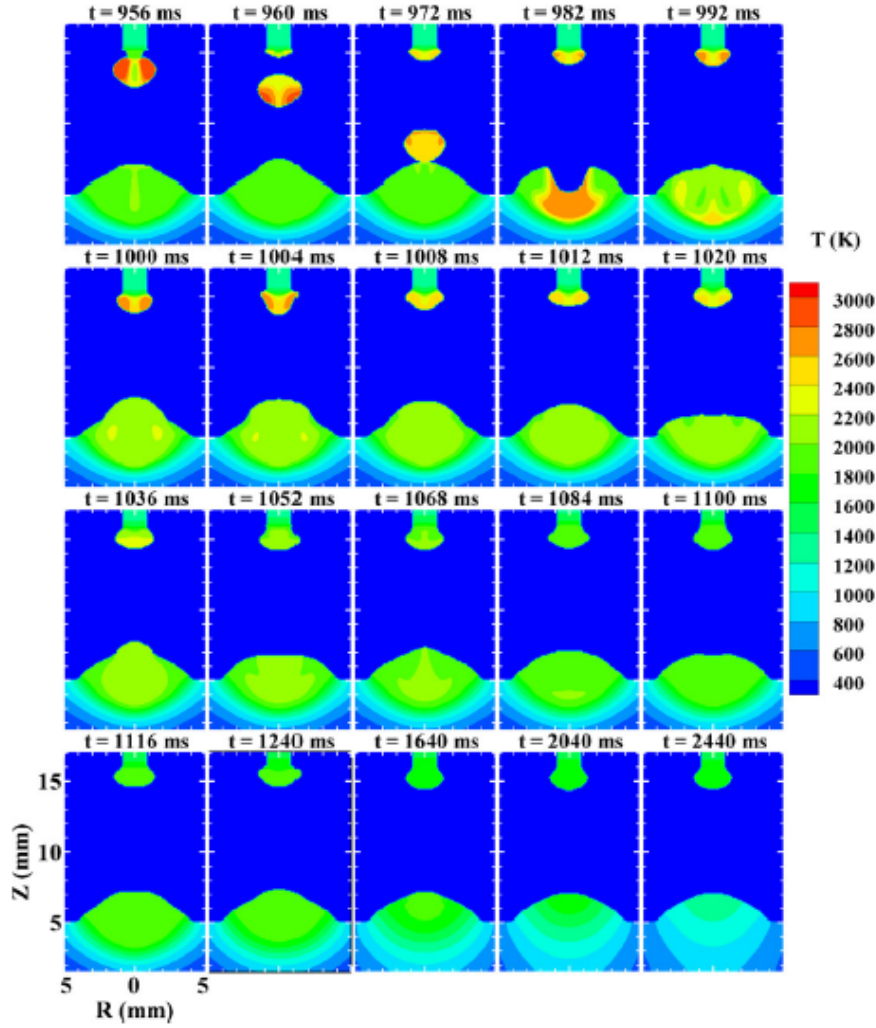


FIGURE 1.27 – Une séquence des distributions de température dans le métal montrant la génération de la gouttelette, le détachement, le transfert dans l’arc, l’impact sur le bain de fusion, et la dynamique du bain de fusion [67]

convection. Par ailleurs, le sens de convection dépend du signe du gradient de tension superficielle qui dépend lui même de la teneur en fer et des éléments tensio-actifs (comme le soufre, l’oxygène, oxydes de titanes...). Dans le cas du fer pur ($d\gamma/dT < 0$), la circulation du métal se fait de la zone centrale chaude vers les bords de la zone fondue, et provoque un étalement du bain. Les effets de la tension de surface s’opposent alors à ceux des forces magnétiques. Dans le cas où $d\gamma/dT > 0$, les effets de tension de surface s’ajoutent à ceux des forces magnétiques et creusent le bain fondu. Notons de plus que l’inversion du gradient $d\gamma/dT$ peut survenir en cours de soudage (figure 1.29).

1.3.3.2 Convection d’origine naturelle et effet des forces électromagnétiques

Lors de la fusion-solidification, certains éléments d’alliages migrent de la partie liquide vers la partie solide et inversement. Cette redistribution chimique et solide entraîne des mouvements convectifs d’origine soluble, qui ont toutefois une importance faible, voire négligeable. En ce qui concerne la convection dite naturelle, il s’agit de mouvements causés par la variation de masse volumique sous l’effet du champ de gravité (ou force de flottabilité Eq.1.19 [32]). La variation de masse volumique dépend des gradients de température et de concentration en espèces chimiques dans le bain fondu. Les mouvements dus aux forces de gravités ont généralement un

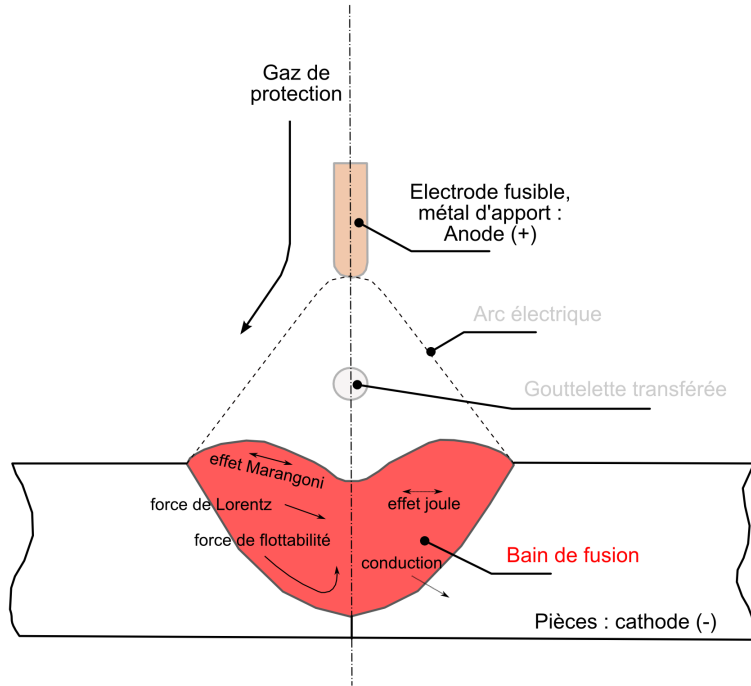


FIGURE 1.28 – Physique du bain de fusion

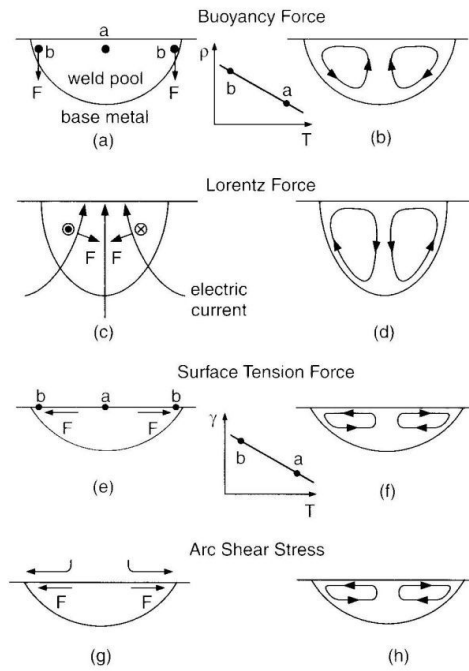


FIGURE 1.29 – Effets des différentes forces sur les mouvements de convection dans le bain fondu [70]

rôle secondaire sur le brassage [8].

$$F_{flottabilite} = -\rho_{ref}\beta(T - T_{ref})g \quad (1.19)$$

Où ρ_{ref} est une masse volumique de référence dans le bain, T_{ref} une température de référence, g l'accélération gravitationnelle, et β le coefficient de dilatabilité.

Le passage du courant électrique dans le bain fondu induit un champ magnétique ($\mathbf{B}$), qui engendre à son tour des forces de Lorentz : agissant sur les particules de métal liquide en créant un flux mobile. L'effet de ces forces électromagnétiques a largement été étudié expérimentalement. Les mouvements résultant de ces forces sont très influents sur la formation du bain, notamment pour les courants de soudage élevés. Dans une configuration de soudage statique sur cible, sans mouvement de la source de chaleur, les forces électromagnétiques induisent un écoulement dirigé en surface, vers l'axe. La chaleur est dirigée vers le bas, le bain de fusion tend à se creuser (figure 1.29).

1.3.3.3 Caractérisation des mouvements de convection

Dans le cadre d'une étude du procédé LBW par Katayama et al [71], un outil a été développé afin de visualiser les cellules de convection dans la zone fondue. Ils ont utilisé les rayons X et des billes de tungstène. Les billes sont les traceurs, et les rayons X avec une caméra rapide adaptée (200 i.s^{-1}) permettent de suivre leurs évolutions au sein du bain de fusion. L'effet des billes sur les mouvements de convection est discutable. Cependant, l'outil est très original, et révèle des ordres de grandeurs des vitesses fluide au sein du bain pour différents modes opératoires (figure 1.30).

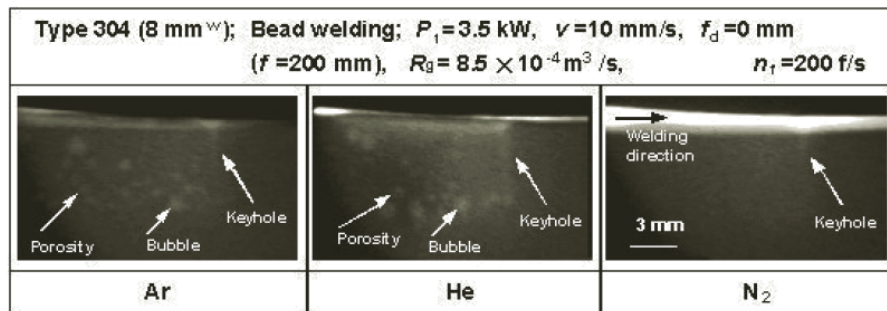


FIGURE 1.30 – Images obtenues par Rayons X en LBW en mode Keyhole avec les traceurs pour la caractérisation des cellules de convection [71]

1.3.3.4 Influence de la convection sur la géométrie du bain

La présence de certaines impuretés dans le métal de base peuvent affecter la géométrie du bain fondu en soudage à l'arc. L'acquisition des mouvements du bain avec une caméra rapide a montré l'influence des oxydes de Titanes sur sa géométrie, et par conséquent sur ses mouvements de convection internes. C. R. Heiple et J. R. Roper [72] ont proposé l'effet Marangoni comme "maitre" des mouvements de convection dans le bain fondu et le fait que certains éléments peuvent altérer cet effet, par la dépendance des tensions de surface aux gradients de température. C'est pour cette raison que l'effet Marangoni peut être inversé et amplifié par la simple présence de ces éléments chimiques. Et ces changements ont une influence évidente sur la géométrie du bain fondu. Ces résultats ont été démontrés par ces derniers expérimentalement.

La composition chimique n'est pas le seul paramètre à avoir une influence sur la géométrie du bain. L'augmentation du courant produit une énergie incidente à la pièce plus élevée. Le métal a alors une énergie plus conséquente pour sa fusion. Ainsi, le bain devrait avoir une taille plus importante. C'est ce qui ressort de l'étude de Niles et al. [33] présentée sur la figure 1.31. L'aire de la section du bain peut doubler entre 125 A et 225 A lorsque l'on utilise de l'argon comme

gaz de protection. Aussi, l'augmentation des dimensions du bain est observée pour l'hélium et pour différentes vitesses de soudage.

Cependant, comme le soulignent Mills et Keene [73], la géométrie du bain n'est pas forcément comme on pourrait le prévoir, c'est-à-dire plus pénétrée pour les aciers à haut soufre, et, moins pénétrée et plus large pour les aciers à bas soufre. En effet, une augmentation du courant augmenterait l'intensité de la force électromagnétique et donc de la force de cisaillement sur la surface du bain du fait des vitesses plus élevées engendrées. La force électromagnétique favorise la pénétration alors que la force de cisaillement produit un écoulement convectif élargissant le bain. Ainsi, un courant plus élevé peut produire des changements dans l'intensité des forces opposées mises en jeu dans le bain de soudage, ce qui peut, localement, rendre prédominante l'une des forces par rapport à une autre, et causer une géométrie de bain peu intuitive.

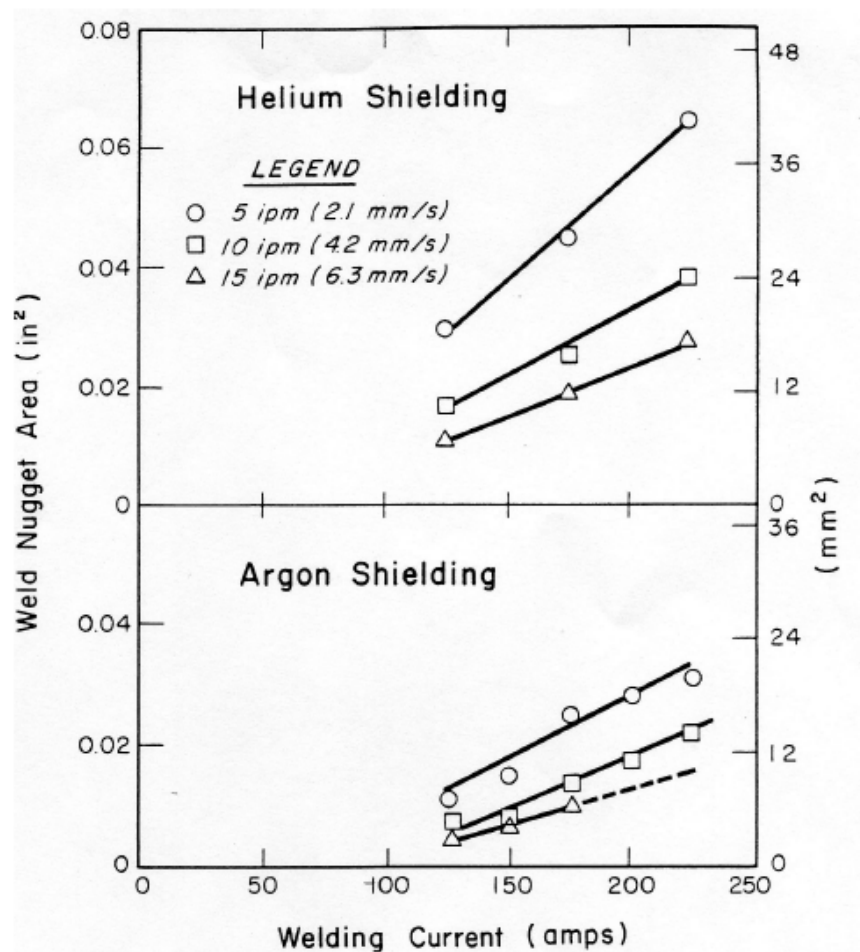


FIGURE 1.31 – Evolution de l'aire de la section du bain de soudage (mm^2) en fonction du courant (A) d'une pièce en acier HY-80 en GTAW [33]

Un des effets les plus importants causé par l'augmentation de la hauteur d'arc est l'accroissement de la force de cisaillement sur la surface du bain car plus la hauteur d'arc est importante plus la vitesse du plasma sur la surface du bain l'est. D'ailleurs, Matsunawa et al. [74] affirment que, dans le bain, cette force devient prédominante sur les autres pour de grandes hauteurs d'arc, c'est-à-dire d'environ 8 mm. Cette force vient contrecarrer la pénétration causée par l'effet Marangoni pour les aciers à haut soufre.

L'effet de la pénétration a également été étudié par Burgardt et Heiple [75]. Ils montrent que, excepté pour un type d'acier à bas soufre, plus la hauteur d'arc est faible, plus le facteur

P/L est élevé, car plus la pénétration est importante.

Sur la figure 1.32 on peut remarquer que pour des valeurs d'hauteur d'arc supérieures à $3/4$ mm on peut noter une tendance à la stabilisation de ce rapport P/L . Ceci est en accord avec ce qui a été énoncé précédemment. En effet, pour des hauteurs d'arc importantes, les forces de cisaillement deviennent prédominantes, et donc la largeur du bain L augmente.

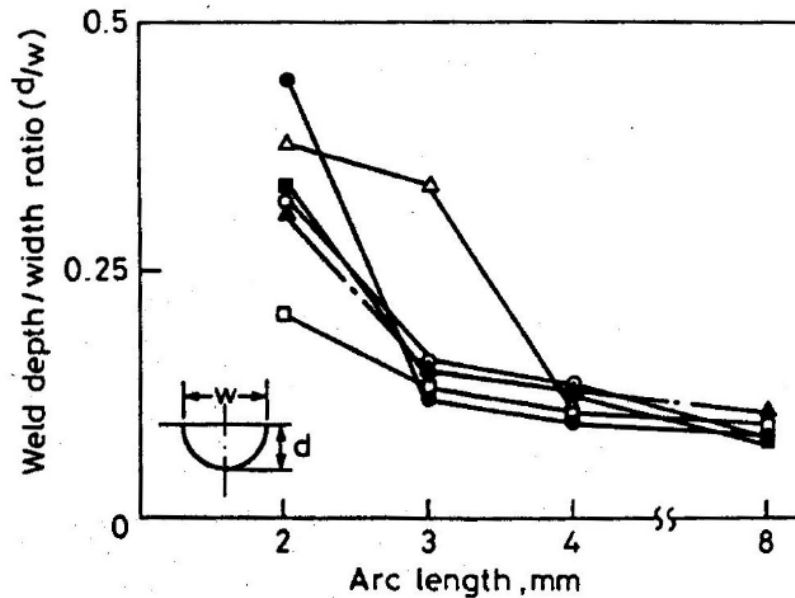


FIGURE 1.32 – Evolution du rapport P/L en fonction de la hauteur d'arc (mm) et pour différents aciers en GTAW (chaque symbole représente un acier) [73]

Ainsi, il apparaît difficile d'établir une généralité concernant l'évolution du rapport P/L en fonction du courant mais aussi en fonction des autres paramètres de soudage. Cette conclusion est confirmée par les travaux visibles dans la littérature, où les évolutions du rapport P/L sont souvent très nuancées du fait des différences dans les paramètres opératoires et matériaux utilisés.

1.3.3.5 Caractérisation dynamique de la géométrie du bain de fusion

De nombreuses méthodes expérimentales existent avec pour objectif la mesure de la géométrie du bain de fusion en cours de soudage [4; 76; 77; 78; 79; 80].

Kovacevic et Zhang mesurent la géométrie en surface du bain de fusion lors d'une opération d'assemblage en soudage TIG [4; 76]. Ils utilisent une caméra rapide associée à un éclairage laser (méthode par réflexion spéculaire) afin de s'affranchir de l'arc électrique sur les images acquises (figure 1.33 (a)). Aussi, ils ont développé un algorithme de traitement d'images capable de détecter le contour d'un bain de fusion TIG en temps réel (figure 1.33 (b)).

N.M. Carlson et J.A. Johnson [79] ainsi que D.E. Hardt [80; 81] utilisent un transducteur à ultrasons pour évaluer la pénétration du bain en cours de soudage. La géométrie de la paroi latérale car elle est pénétrée par le bain de fusion au cours du gaz soudage à l'arc (GMAW) peuvent être détectés par ondes sonores à haute fréquence. La géométrie de pénétration est détectée par un transducteur piézo-électrique, opérant dans le mode impulsion-écho; il génère des ondes sonores qui se déplacent à travers le métal de base puis la zone fondue. Les échos reçus contiennent des informations qui peuvent être liées à la pénétration latérale et donc à la qualité de la soudure. Différentes géométries peuvent être distinguées en utilisant les méthodes adéquates, offrant ainsi la possibilité d'envoyer des informations sur le flanc de pénétration à un système de soudure en

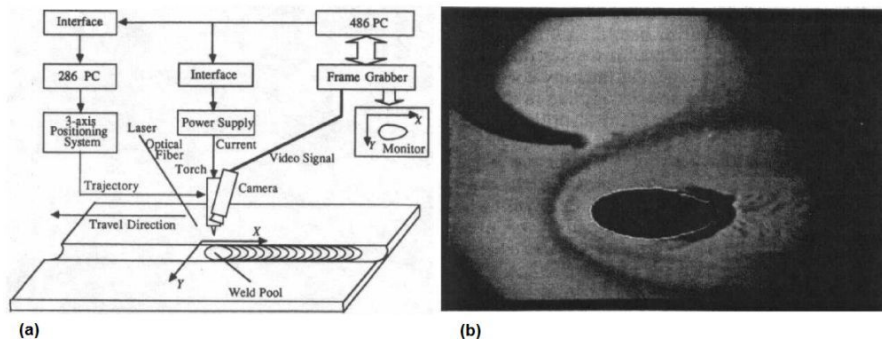


FIGURE 1.33 – Dispositif expérimental (a) et une image acquise avec détection de contour (b) [76]

circuit fermé pour le contrôle en temps réel du procédé pour assurer la qualité de l'opération [79].

L'ensemble de ces moyens de caractérisation expérimentale a été étudiés pour le développement de solutions de contrôle pour les procédés à arc. Or, on peut y voir aussi des moyens de caractérisation intéressants pour la compréhension du comportement du procédé en fonction des paramètres d'entrée d'un modèle (Energie, gaz, la géométrie du bain, un temps caractéristique d'établissement, etc) et en sortie des informations de champs (températures, vitesses d'écoulement, etc.).

1.3.3.6 Rôle de la convection sur la microstructure solidifiée

Dans le milieu des années 60, Savage et al [82] ont étudié les liens entre les paramètres de soudage et la solidification de la microstructure. Leur principal avancée fut de dire que la vitesse de soudage et le courant de soudage sont les deux facteurs majeurs de la solidification. A chaque vitesse de soudage nous rencontrons un type de solidification, à haute vitesse, un bain fondu étiré est produit avec des grains de forme colonnaire ; à une vitesse faible une fissure peut apparaître au centre du cordon de soudure avec un bain de forme elliptique.

Nous notons que ces deux facteurs sont étroitement liés aux mouvements de convection dans le bain [42]. De plus les modes de solidification et la microstructure ont été étudiés dans des conditions de refroidissement extrêmement rapide. Donc les points dépendant de ces deux facteurs sont la formation de grains de tailles variables gouvernée par le gradient de température, et la zone pateuse à l'interface liquide/solide. Les mouvements de convection altèrent la forme du cordon, le profil des températures le long du bain mais aussi la vitesse de solidification (figure 1.34).

Il apparaît alors de forts couplages entre le développement de la microstructure, les mouvements de convection dans le bain fondu et les paramètres de soudage.

1.3.3.7 Modèles numériques : Bain

De nombreux modèles qui ont pour objectif la modélisation du bain de soudage existent [83; 43; 84]. En particulier, le modèle de Hu et al [43] fait référence. Ils développent un modèle 3D avec prise en compte de la surface libre (déformation de surface) du bain et de la variation des tensions de surface en fonction de la température. Un résultat présenté à la figure 1.35 montre une vue partielle du bain de fusion, avec la géométrie de la surface libre en un instant t et les vitesses d'écoulement calculées en surface.

Aux sections 1.3.1.6 et 1.3.2.2, les parties arc et bain du même auteur ont été présentées. L'intérêt de l'enrichissement de la simulation numérique par des quantités dimensionnelles me-

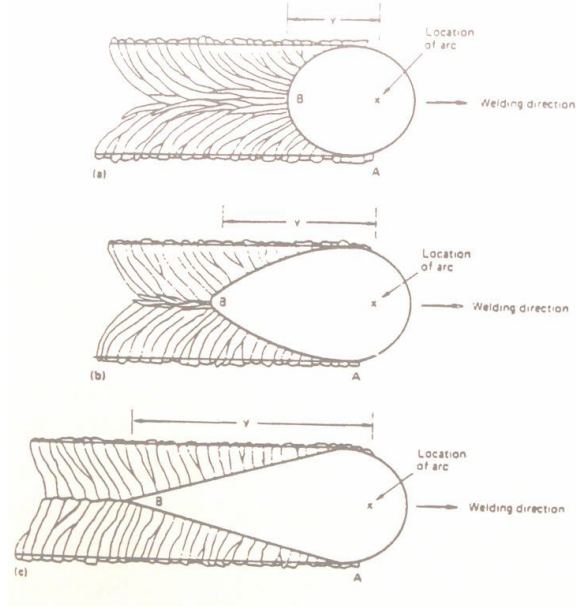


FIGURE 1.34 – Comparaison de la géométrie du bain fondu en fonction du paramètre vitesse de soudage [42]

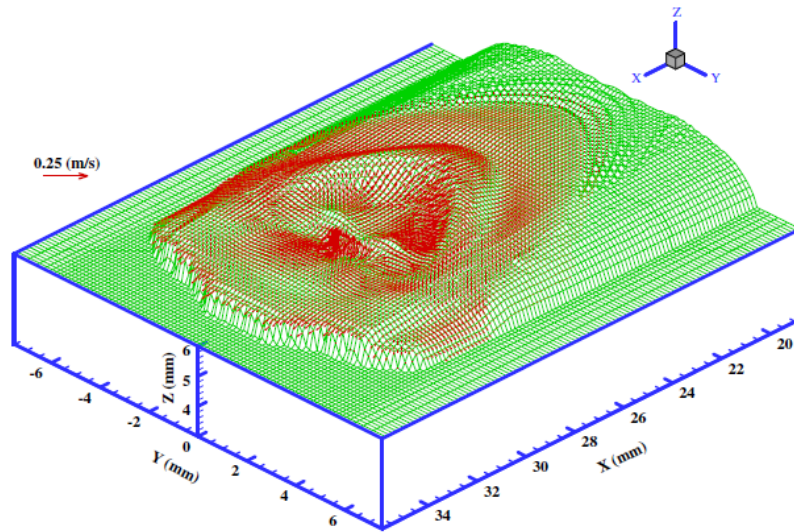


FIGURE 1.35 – Vue partielle du bain de fusion en 3D, de sa géométrie et des vitesses d'écoulement à $t = 2.938s$ [43]

surées expérimentalement au cours de l'opération en **GMAW** a été discuté. Il s'agit par exemple d'étudier l'effet du courant sur l'évolution du ménisque à l'extrémité de l'électrode, jusqu'à la rupture du pont liquide puis sur l'évolution de la géométrie, la trajectoire et la vitesse de la goutte en vol libre jusqu'à son impact dans le bain de fusion. Son impact pourrait être caractérisé expérimentalement par la mesure du profil de la surface libre du bain de fusion et aussi l'évolution de sa surface via des dispositifs expérimentaux comme celui de Kovacevic [85]. On pourrait par exemple évaluer l'effet de l'énergie cinétique de la goutte sur le bain de fusion. Cependant, l'expérimentation donnerait accès à des profils géométriques 2D alors que le numérique donne accès à des informations 3D. Enfin, l'évolution des paramètres de soudage associée à celle de la surface libre du bain pourrait également être intéressant pour l'alimentation des modèles

numériques.

1.3.4 Transfert thermique

L'arc électrique, et surtout le plasma de couverture, transmettent à la pièce un flux de chaleur intense. Une partie de l'énergie émise est perdue par convection et rayonnement autour de la colonne d'arc. L'énergie qui pénètre dans la pièce crée un bain de fusion. Dans ce bain de fusion, la chaleur se transmet par conduction, mais également par convection, cette dernière influençant tout particulièrement la forme du front de fusion. En outre, à la frontière liquide-solide, le flux de conduction qui passe de la partie liquide à la partie solide subit une discontinuité, égale à la chaleur latente de changement de phase. Dans la partie solide, les transferts de chaleur se font par conduction uniquement. Sur les bords solides de la pièce, les échanges avec l'environnement sont de types radiatifs et convectifs [8; 32; 86].

1.3.4.1 Energie transmise à la pièce

L'étude de Nestor [87], qui a pour objet la mesure de densités de courant et de flux de chaleur à la surface supérieure de la pièce en fonction de la valeur du courant en GTAW, fait référence pour le développement de méthodes expérimentales et la validation de modèles numériques. L'influence de l'intensité sur l'énergie transmise à la pièce trouvée par ce même auteur est présentée sur la figure 1.36a. On peut remarquer que la valeur maximale du flux de chaleur double entre 100 A et 200. En revanche, pour un courant supérieur, elle ne semble pas évoluer énormément. Cette dernière conclusion est contredite par les travaux plus récents de Tsai et al. [88] basés sur un dispositif expérimental équivalent à celui de Nestor [87]. En effet, comme on peut le voir sur la figure 1.36b, la valeur maximale du flux de chaleur évolue toujours au-dessus de 200 A. Les valeurs des courbes obtenues ne sont pas comparables car les angles d'affûtage de l'électrode et les hauteurs d'arc ne sont pas équivalents. Ainsi, les différences de comportement au-dessus de 200 A peuvent être causées par la modification de ces paramètres. Enfin, pour les deux études, la distribution de la densité de courant est plus large lorsque l'intensité augmente. L'énergie totale transmise à la pièce augmente lorsque le courant augmente. L'anode utilisée pour ces expériences étant en cuivre refroidi, il n'y a pas de création d'un bain de soudage. Cependant, au vu des résultats de la littérature, ces tendances semblent s'appliquer lorsqu'il y a la présence d'un bain de fusion [87; 88]. En effet, la figure 1.37 issue des travaux de Ghent et al. [89] illustre bien la forte augmentation de l'énergie transmise à la pièce avec le courant, puisqu'il y a environ un facteur 2 entre les énergies transmises à 90 A et à 180 A.

La puissance totale du procédé étant plus élevée lorsque la hauteur d'arc augmente, on pourrait penser que l'énergie incidente à la pièce serait plus élevée. Cependant, la figure 1.37 montre qu'il y a seulement qu'une très faible augmentation de l'énergie transmise lorsque la hauteur d'arc augmente. Aussi, comme on peut le voir sur la figure 1.38(b), l'augmentation de la hauteur d'arc conduit à une diminution de la densité d'énergie et donc, à une augmentation de la taille de la zone d'accroche de l'arc sur la pièce à souder.

L'ensemble de ces tendances est confirmé par l'étude de Tsai [90] présentée sur la figure 1.39.

L'étude de Goodarzi et al. [91] présentée sur la figure 1.40(a), montre que la valeur maximale du flux de chaleur transmis à la pièce augmente lorsque l'angle d'affûtage passe de 18° à 60° , puis baisse lorsque l'angle augmente jusqu'à 100° . Ensuite, elle stagne pour des angles plus grands, excepté lorsque la hauteur d'arc est petite (2 mm) où, elle réaugmente légèrement pour des angles supérieurs à 120° . Au contraire, Tsai [90] constate (figure 1.40(b)), qu'il y a une augmentation d'environ 20% entre le maximum du flux de chaleur transmis à la pièce lorsque l'angle passe de 120° à 30° pour une hauteur d'arc de 5,5 mm. Cependant, bien qu'il y ait des différences entre ces valeurs, l'angle d'affûtage de la cathode semble moins influent sur le flux de chaleur transmis à la pièce que le courant et la hauteur d'arc. D'ailleurs, Tsai conclut que le paramètre de distribution de ce flux de chaleur augmente seulement de 14% quand l'angle

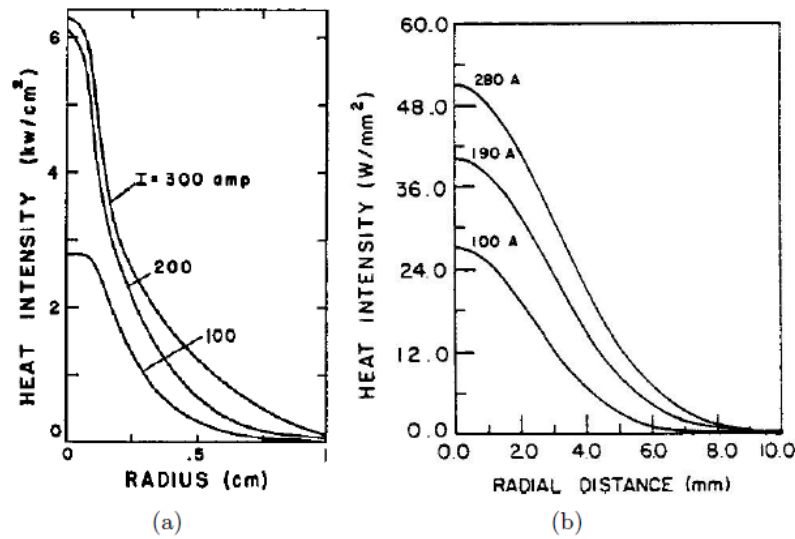


FIGURE 1.36 – Evolutions des flux de chaleur en GTAW sur la face endroit pour différentes intensités, mesurés par [87] (a), et ceux mesurés par [88] (b)

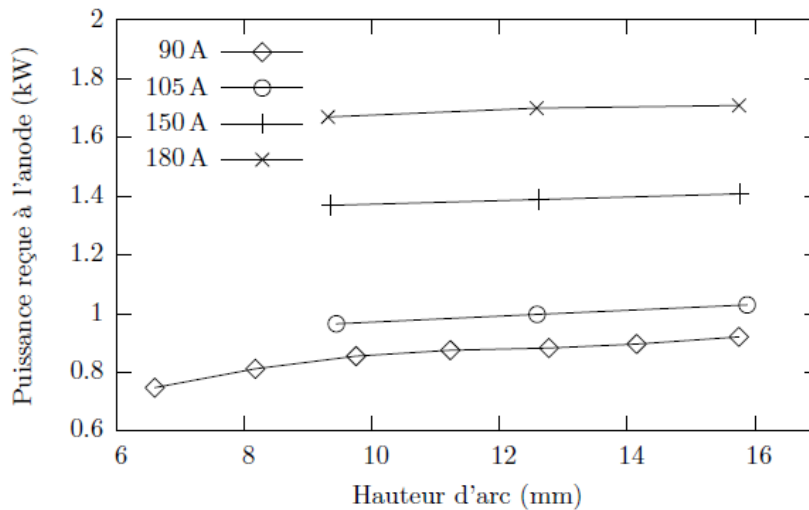


FIGURE 1.37 – Energies collectées (kW) en GTAW par une pièce en acier doux en fonction de la hauteur d'arc (mm) et du courant (A) [89] (figure de [32])

de l'électrode passe de 30° à 120° . Selon Heiple [92], la différence obtenue entre le pic des flux de chaleur transmis à la pièce en passant d'un angle de 120° à 30° , reviendrait à augmenter le courant de 100 A à 135 A.

1.3.4.2 Rendement du procédé

De l'énergie totale émise, seule une partie participe effectivement à la fusion du métal [93]. Le reste est perdu par convection et rayonnement. La fraction de l'énergie ainsi perdue est très dépendante entre autre des conditions de soudage, de la hauteur d'arc, du débit et de la nature de gaz. Quelques rendements types pour les procédés GTAW et GMAW sont donnés dans le tableau 2.2.

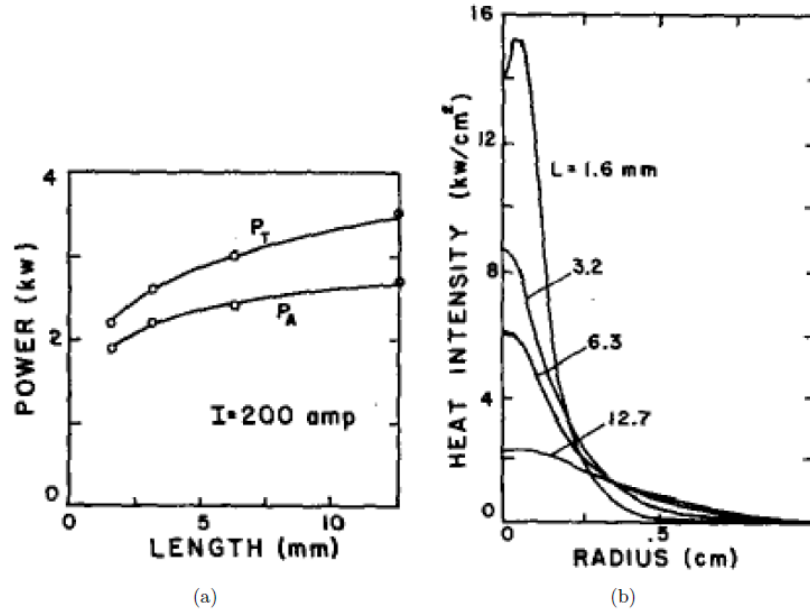


FIGURE 1.38 – (a) Evolutions en GTAW de la puissance totale P_T (kW) et de la puissance reçue par l'anode P_A (kW) en fonction de la hauteur d'arc (mm), (b) évolutions du flux de chaleur (kW.cm^{-2}) en fonction du rayon de l'anode (cm) pour différentes hauteurs d'arc (mm) [87]

Procédé	Rendement η
<i>Gas Tungsten Arc (GTAW)</i>	
Bas courant DC polarité directe	0.4 - 0.6
Haut courant DC polarité directe	0.6 - 0.8
Polarité inverse	0.2 - 0.4
Courant AC	0.2 - 0.5
<i>Gas Metal Arc (GMAW)</i>	
Transfert par court-circuit et globulaire	0.6 - 0.75
Transfert par pulvérisation axiale	0.65 - 0.85

TABLE 1.1 – Rendement théoriques de procédé à l'arc [3]

Ce rendement peut être déterminé expérimentalement par calorimétrie en mesurant la chaleur transmise à la pièce pour différentes conditions opératoires [93] (figure 1.41).

On peut citer la calorimétrie utilisant une enveloppe Seebeck, la calorimétrie à azote et à eau, et la méthode d'évaluation à partir de la résolution de l'équation de Rosenthal [33]. Pour cette dernière, les données d'entrée sont les températures obtenues par des thermocouples positionnés sur la pièce.

En ce qui concerne le calorimètre à enveloppe Seebeck [94; 95], l'échantillon est placé sur la face inférieure du calorimètre. Une soudure est réalisée et le calorimètre est fermé immédiatement après. Le système de mesure utilise le principe des gradients thermiques pour produire une tension proportionnelle au flux de chaleur qui traverse les parois du calorimètre.

Le principe du calorimètre à azote est de placer, juste après l'essai, la pièce soudée dans un vase Dewar (récipient conçu pour avoir une bonne isolation thermique) rempli d'azote liquide. L'azote évaporé permet de calculer l'énergie récupérée par l'échantillon. Sur le même principe, on peut utiliser un calorimètre à eau [31], où l'élévation de la température de l'eau contenue

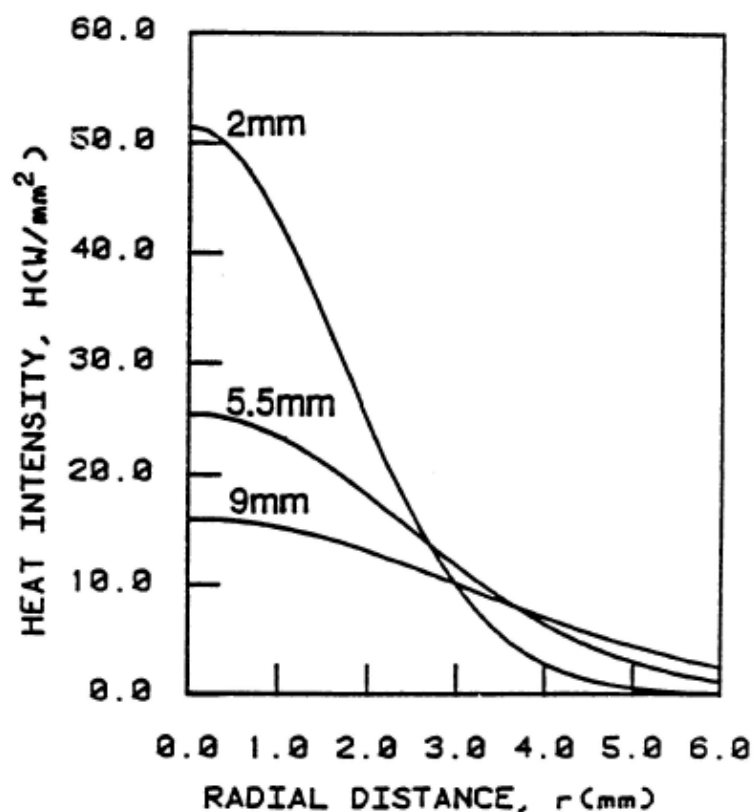


FIGURE 1.39 – Distributions en GTAW du flux de chaleur ($W.mm^{-2}$) en fonction du rayon (mm) de l'anode en cuivre pour une intensité 100 A, un angle d'affûtage de l'électrode de 75° et pour différentes hauteurs d'arc (mm) [90]

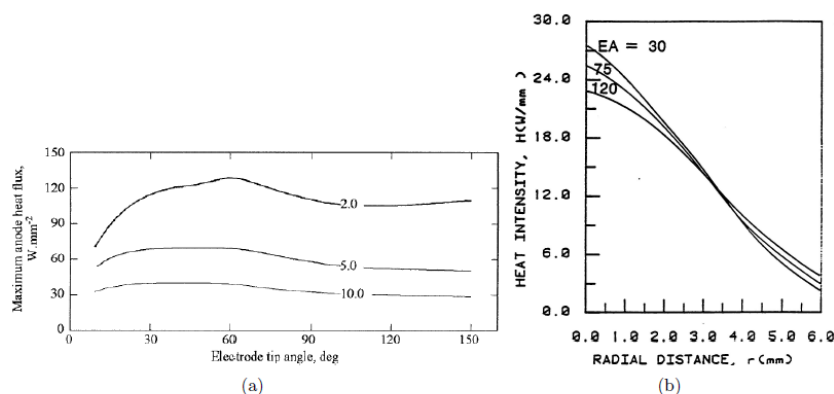


FIGURE 1.40 – (a) Maximum du flux de chaleur transmis à la pièce ($W.mm^{-2}$) en fonction de l'angle d'affûtage de l'électrode ($^\circ$) et de la hauteur d'arc (mm) pour un courant de 200 A [91], (b) évolutions du flux de chaleur transmis à la pièce ($W.mm^{-2}$) en fonction du rayon de la pièce (mm) pour un courant de 190 A et une hauteur d'arc de 5.5 mm [90]

dans un vase Dewar permet de calculer l'énergie qui a été transmise à l'échantillon.

Contrairement à l'étude de Niles et al [33]. (figure 1.43(b)), qui estiment un rendement baissant avec l'intensité et compris entre 35 et 65%, les autres auteurs concluent que le rendement de l'arc varie entre environ 70 et 80%. Ces valeurs ont été obtenues par les études plus récentes

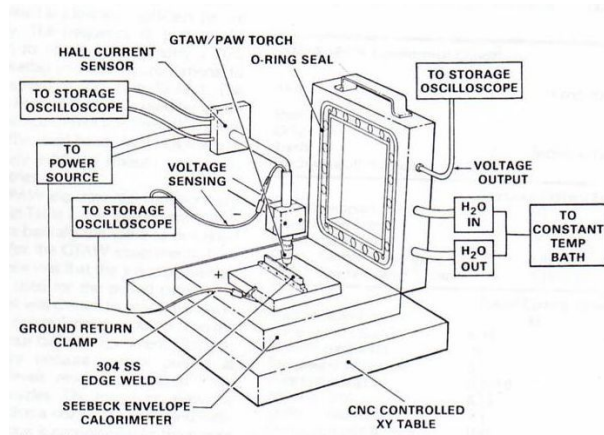


FIGURE 1.41 – Calorimètre à enveloppe Seebeck pour la mesure des rendements des procédés PAW et GTAW [93]

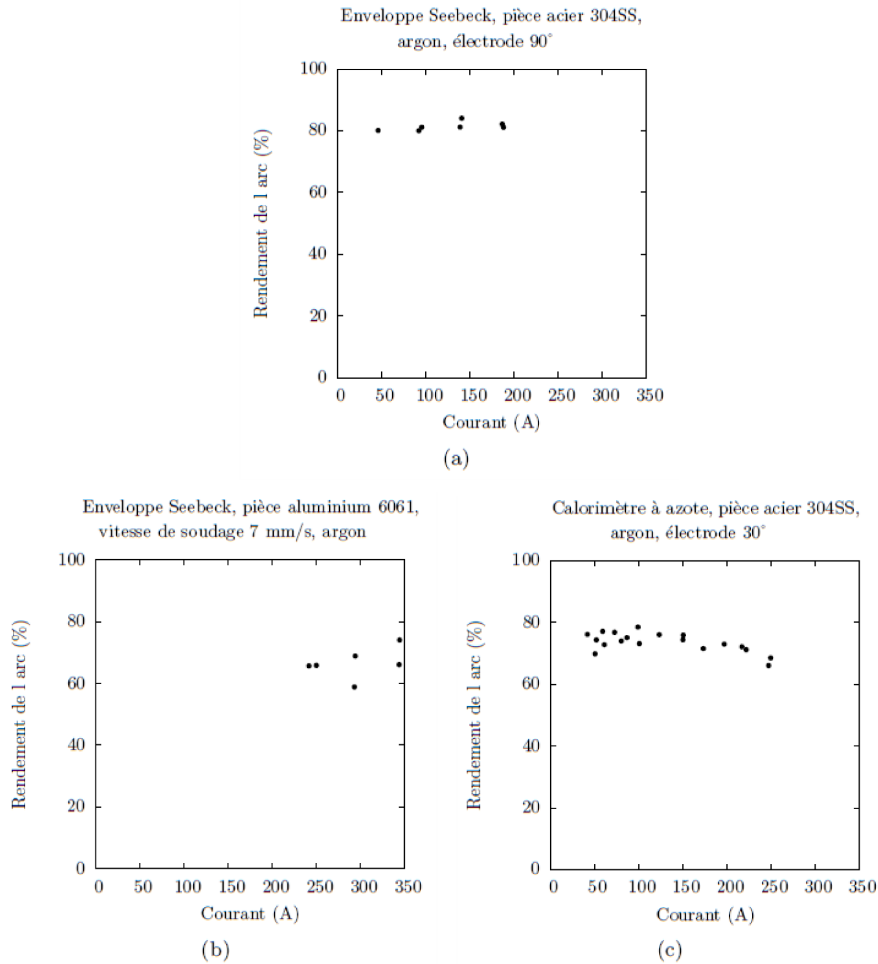


FIGURE 1.42 – Rendement de l'arc (%) en fonction du courant (A) selon différents auteurs : (a) [94], (b) [95], (c) [96] et pour différents paramètres de soudage (figure de [32])

de Giedt et al. [94], Dupont et al. [95], et, Smartt et al. [96], où, pour ces trois articles une anode en acier est utilisée. Cependant, l'évolution du rendement en fonction du courant est différente pour chacune des études. En effet, sur les figures 1.42(a) et 1.42(b) le rendement n'évolue pas ou très peu avec l'intensité. Sur la figure 1.42(c), le rendement augmente jusqu'à 100 A puis

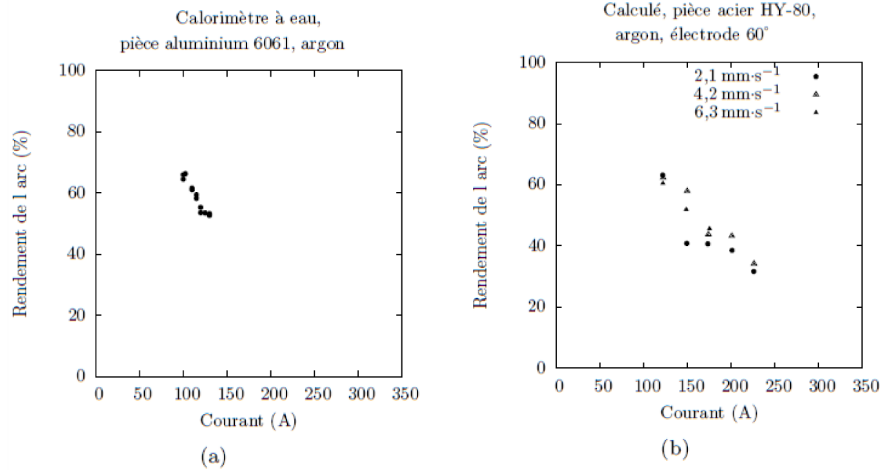


FIGURE 1.43 – Rendement de l'arc (%) en fonction du courant (A) selon différents auteurs : (a) [31], (b) [33] et pour différents paramètres de soudage (figure de [32])

diminue légèrement.

Cependant, les résultats semblent être différents pour une pièce en aluminium. C'est ce que montre la figure 1.43(a), où le rendement diminue avec l'intensité. Néanmoins, les différences dans les conditions opératoires, les techniques de mesures, la gamme de courant utilisées et surtout, des résultats obtenus, ne permettent pas d'effectuer une conclusion générale concernant l'évolution du rendement en fonction du courant.

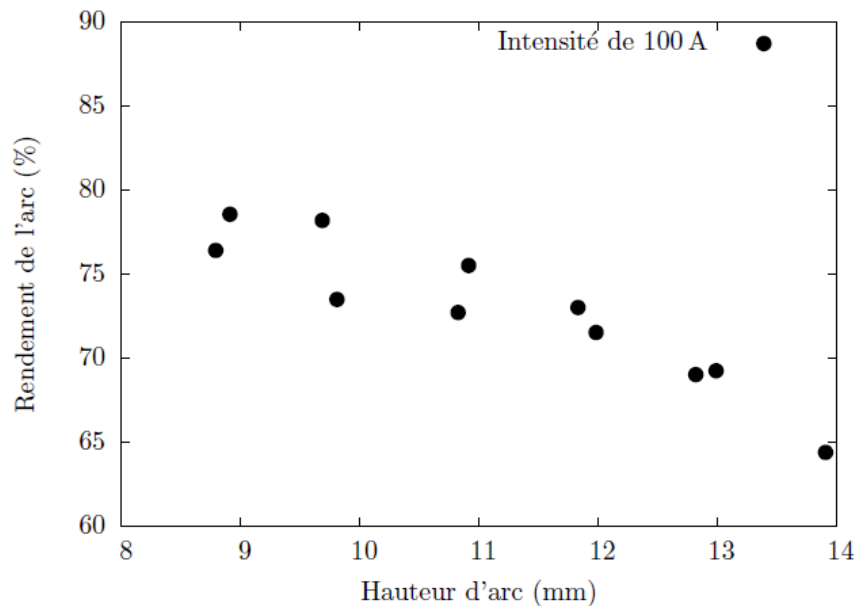


FIGURE 1.44 – Evolution du rendement de l'arc (%) en fonction de la hauteur d'arc (mm) pour une anode en 304SS, sous argon, et une électrode affûtée à 30° [96](figure de [32])

Pour une valeur de courant constante, une augmentation de la hauteur d'arc conduisant à une augmentation de la puissance totale de l'arc, mais aussi à une stagnation de l'énergie incidente à la pièce, le rendement diminue donc avec la hauteur d'arc. Cette conclusion est illustrée par la figure 1.44 issue des travaux de Smartt et al. [96]. Ceci est confirmé par les travaux de Ghent

et al. [89], et de Choo et al. [42]. Cette tendance est aussi observée et confirmée par la figure 1.38(a) [87] où en augmentant la hauteur d'arc, la puissance reçue à l'anode augmente moins vite que la puissance totale du procédé.

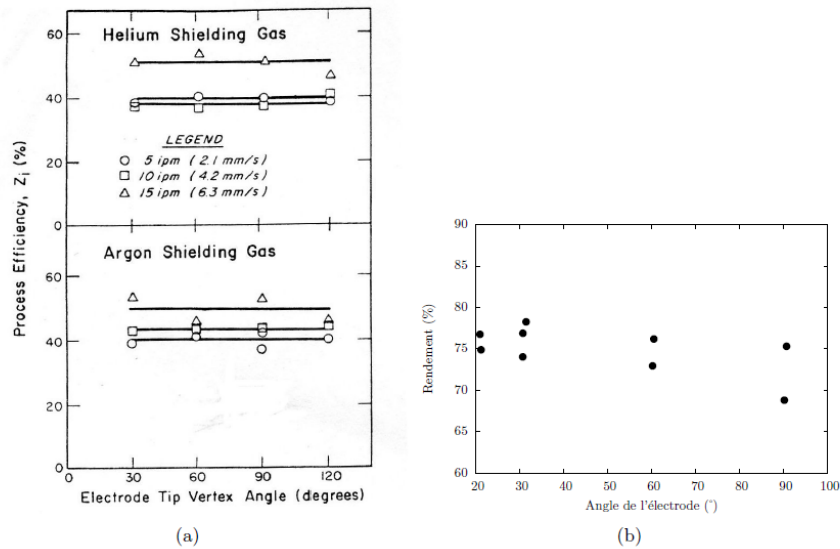


FIGURE 1.45 – Rendements en fonction de l'angle d'affûtage de l'électrode pour (a) différents gaz de couverture, différentes vitesses de soudage, une pièce en acier HY-80, un courant de 175 A, et une hauteur d'arc de 2.54 mm [33], et (b) pour de l'argon, une électrode immobile, une pièce en acier 304SS, un courant de 100 A et une tension de 10 V [96] (Figure (b) de [32])

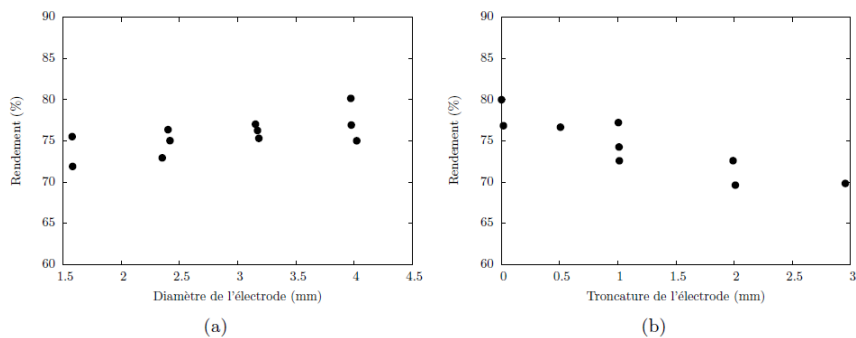


FIGURE 1.46 – Influence (a) du diamètre de l'électrode (mm) et, (b) de la taille de la troncature (mm) de la pointe de l'électrode pour de l'argon, une électrode immobile, une pièce en acier 304, un courant de 100 A et une tension de 10 V [96] (Figure de [32])

Comme on peut le remarquer sur la figure 1.45(a), le rendement de l'arc évolue peu avec l'augmentation de l'angle d'affûtage de la cathode. En revanche, Smartt [96] et al. concluent que le rendement diminue lorsque cet angle augmente (cf. figure 1.45(b)). Aussi, il montre que le rendement d'arc diminue lorsque le diamètre de la troncature augmente (cf. figure 1.46(b)) et quand le diamètre de l'électrode diminue (cf. figure 1.46(a)). Pour cette étude, la tension est fixée (régulation en tension ajustée par la hauteur d'arc), et donc, la puissance injectée dans le procédé l'est également. Comme il a été mentionné précédemment, la modification de l'angle d'affûtage de la cathode modifie la tension de l'arc. Si elle est fixée, la hauteur d'arc évolue avec la tension. Ainsi, la modification du rendement observée par Smartt [96], peut être liée à la modification de la hauteur d'arc, qui a une forte influence sur le rendement.

Aussi, sur la seule base de ces deux études répertoriées, il n'est pas possible d'établir une généralité concernant l'influence de la géométrie de l'électrode sur le rendement de l'arc.

1.3.5 Conséquences métallurgiques des cycles thermiques en soudage

Les opérations de soudage affectent profondément les structures métallurgiques [86]. Deux phases de transformations distinctes peuvent être identifiées, l'une en cours de soudage et l'autre à l'état solide.

Au sens strict, le caractère rapide des cycles thermiques de soudage ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Cependant, il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme (figure 1.47) pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales [2]. Dans le cas d'un acier bas carbone, les transformations métallurgiques à décrire sont principalement la transformation austénitique au chauffage, les transformations ferritique, perlitique, bainitique et martensitique au refroidissement.

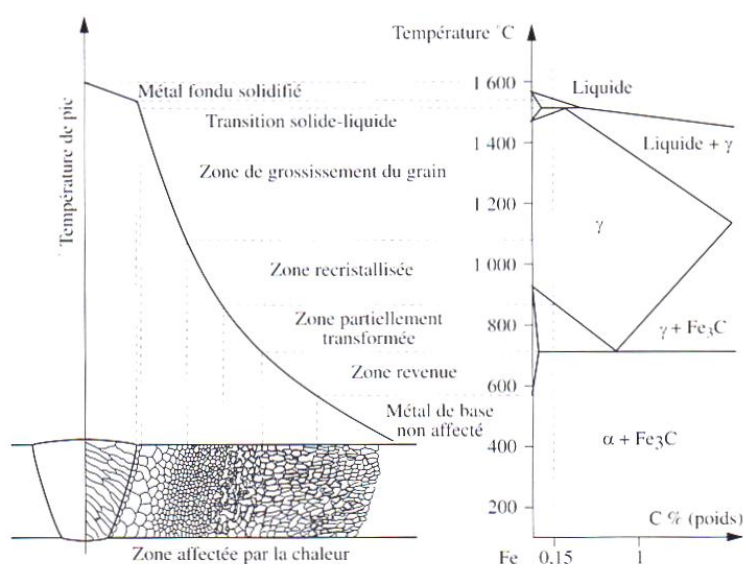


FIGURE 1.47 – Représentation schématique des différentes parties constituant un joint soudé [2]

Dans la zone fondue, il peut y avoir des transformations à l'état solide, donc après la solidification. Dans la zone affectée thermiquement, les transformations se font pendant le temps de chauffe et de refroidissement du cycle thermique de soudage.

Ces transformations microstructurales font référence à la métallurgie du soudage. Cette discipline inter-agit avec la physico-chimie du bain de fusion, la thermique et la mécanique de l'assemblage. Dans une première approche expérimentale multiphysique telle que proposée dans le cadre de cette thèse, les effets métallurgiques ne seront pas directement pris en compte.

1.3.6 Conséquences mécaniques associées au soudage

Les gradients thermiques localisés qui sont mis en jeu lors du soudage engendrent inévitablement des dilatations locales qui ont pour conséquence l'apparition de champs de déformations et de contraintes non uniformes dans le matériau, qui subsistent après retour à température ambiante [2].

Les distorsions ainsi induites par le procédé peuvent poser des problèmes de tolérances dimensionnelles, tout particulièrement si les structures soudées sont minces [97]. D'autre part, les champs de contraintes résiduelles auto-équilibrés qui subsistent après soudage dans le composant

peuvent contribuer à diminuer la durée de vie de celui-ci, en favorisant les ruptures de fatigue, la fissuration [98] et la corrosion. En outre, dans le cas de structures minces, les contraintes internes liées au soudage peuvent induire un état de flambage [99].

Bien que les contraintes résiduelles et les distorsions puissent être diminuées par des traitements thermiques ou mécaniques appropriés, leur détermination apparaît comme essentielle, pour intégrer une meilleure maîtrise des marges de fabrication, pour diminuer les coefficients de sécurité et donc optimiser les coûts de réalisation, ou encore en vue d'une analyse des risques de dommages.

Dans cette optique, la simulation numérique par la Méthode des Éléments Finis est devenue un outil particulièrement intéressant pour prédire contraintes et distorsions résiduelles résultant du soudage (figure 1.48).

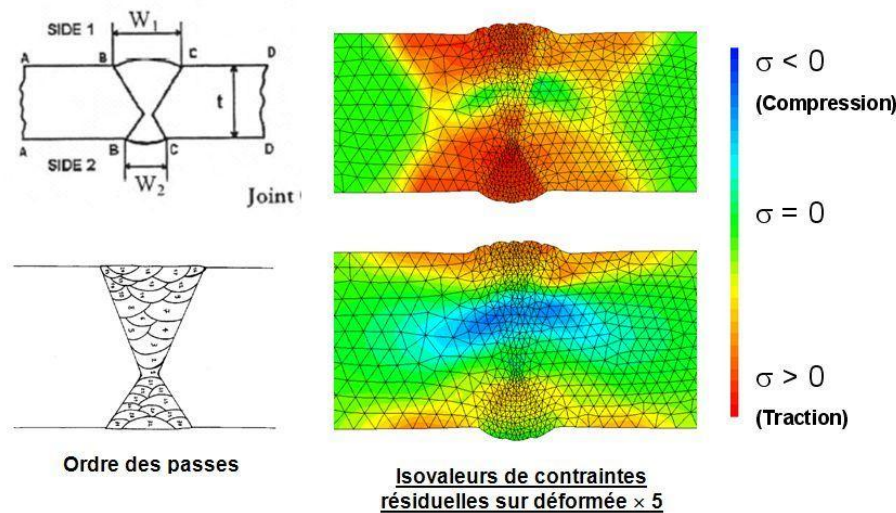


FIGURE 1.48 – Exemple d'un résultat numérique de contraintes résiduelles atteintes pour une soudure multipasses [100]

Le calcul des contraintes et distorsions de soudage nécessite la modélisation de phénomènes complexes thermiques, métallurgiques et mécaniques qui interviennent de façon couplée dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) lors du soudage [100]. Ceci implique notamment :

1. Le calcul de l'évolution thermique transitoire dans les pièces soudées, à partir de la définition de l'apport de chaleur d'après les paramètres de soudage, en tenant compte de toutes les non-linéarités (propriétés thermophysiques dépendantes de la température, chaleur latente de changement d'état, conditions aux limites) ;
2. Le calcul, le cas échéant, de l'évolution des proportions de phases métallurgiques susceptibles d'apparaître lors du soudage (phases bainitique et martensitique dans le cas des aciers faiblement alliés), qui s'accompagne de conséquences mécaniques qu'il peut être indispensable de prendre en compte (déformation métallurgique s'ajoutant à la déformation thermique lors des transformations, comportement plastique multiphasé, plasticité de transformation, etc.) ;
3. Le calcul de l'évolution mécanique transitoire, tenant compte de l'évolution thermique et surtout métallurgique, avec une loi de comportement adaptée pour toutes les phases métallurgiques en présence (écrouissage cinématique, viscoplasticité, etc.)

Ces calculs thermiques, métallurgiques et mécaniques sont menés d'abord par une simulation thermométallurgique, suivie d'une simulation mécanique chaînée tenant compte des effets

thermiques et métallurgiques.

L'expérimentation constitue ainsi une approche complémentaire en permettant par exemple l'accès aux déformations. On peut en effet utiliser des jauges de déformations (électriques ou optiques pour des mesures locales) ou des moyens optiques (mesure de champs de déformations) pour qualifier et quantifier les distorsions et déplacements. Johnson [101] utilise par exemple des moirés en face envers pour mesurer le champs de déformations en cours de soudage.

1.4 Couplages et interactions multiphysiques

Dans cette section, il est proposé une définition de l'opération de soudage confrontant aspects techniques et scientifiques. Une sélection non exhaustive des couplages et des interactions multiphysiques mis en jeu lors d'un assemblage avec les procédés à l'arc est présentée à la figure 1.49.

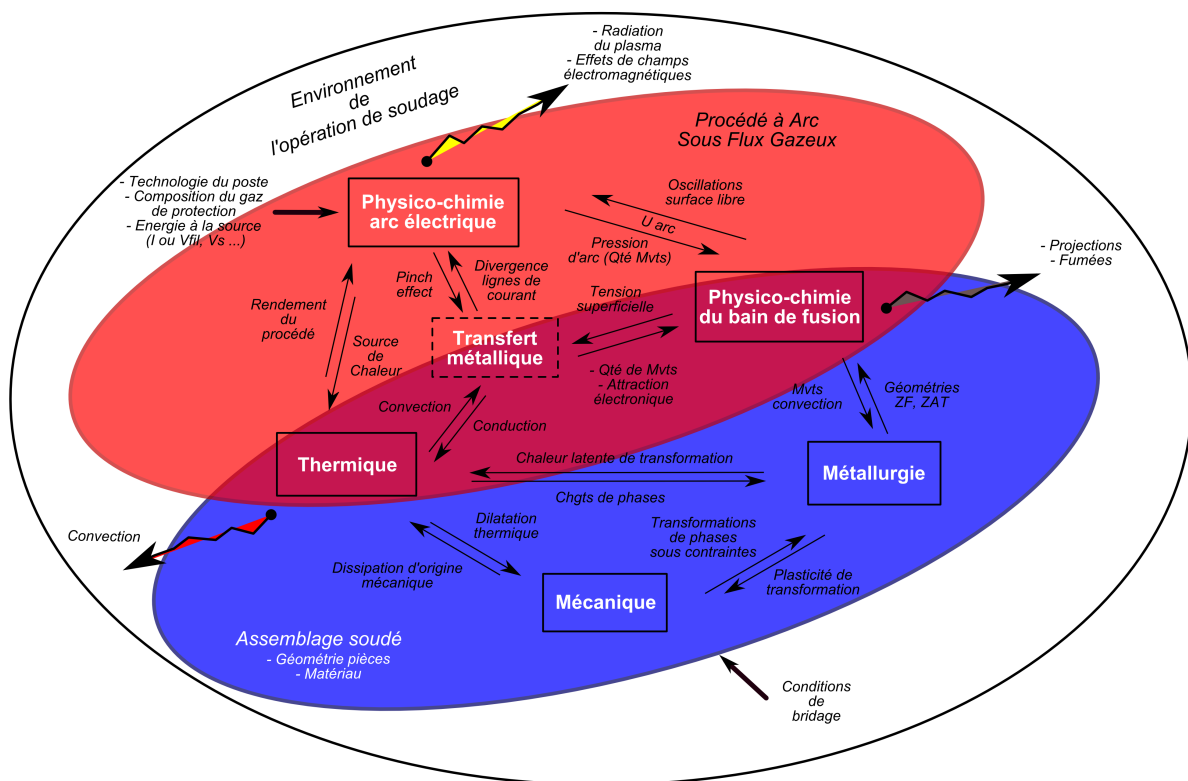


FIGURE 1.49 – Schéma de synthèse des différents phénomènes physiques en soudage et de leurs interactions

Une opération de soudage à l'arc implique un procédé et des pièces à assembler. Le matériaux et la géométrie de l'assemblage auront pour conséquences le choix du procédé, de son énergie, du régime du courant, du gaz de protection, du métal d'apport et des conditions de bridage. Ces conditions opératoires (paramètres de soudage inclus) induisent une physico-chimie de l'arc et un mode de transfert métallique (en soudage MIG-MAG). Le plasma ainsi créé est extrêmement lumineux et induit des effets de champs électromagnétiques importants [58]. A l'interface de l'arc avec l'assemblage, on observe l'établissement du bain de fusion. Le régime stationnaire atteint, les températures dans le plasma sont très élevées, de l'ordre de 19000 K, celles de la gouttelette en vol libre (soudage MIG) de 3000 K et du métal liquide constituant le bain de fusion de 2100 K. On observe aussi un phénomène de vaporisation métallique qui induit des fumées parfois toxiques et, dans le cas du soudage MIG-MAG, des projections métalliques dues principalement à des courts

circuits entre l'électrode fusible et le bain de fusion [21]. Toujours à l'interface, la surface libre va subir les actions répétées de la pression de l'arc, de l'apport de matière. Les gradients de températures, combinés aux compositions chimiques du bain et de l'arc, vont créer des gradients de tensions superficielles à l'interface bain liquide/arc [102]. Ces derniers, associés aux forces de Lorentz, entretiennent les mouvements de convection au sein du bain de fusion [70]. Il en résulte une zone fondue dont la géométrie est conditionnée par le temps de maintien en fusion et la solidification, et une zone affectée thermiquement (ZAT), elle-même exposée à des variations thermiques conduisant à des transformations microstructurales à l'état solide, sans fusion [15].

Même si cette définition n'est pas exhaustive, les modélisations de l'arc, du transfert de métal, du bain etc. présentées dans ce premier chapitre illustrent la diversité des phénomènes physiques mis en œuvre lors d'une opération de soudage à l'arc.

Les modèles numériques orientés "procédé" permettent de calculer la distribution des températures dans l'arc [47], les mouvements de la goutte en vol libre [67] et du bain de fusion [43]. Il est également possible d'étudier la variation de la position de la surface libre suivant différents régimes de courant et avec le transfert de métal en fusion en **GMAW** [103]. Les cinétiques d'écoulement au sein du bain de fusion peuvent aussi être calculées, grâce à la simulation des mouvements de convection prenant en compte les gradients thermiques, les forces de Lorentz, la pression de l'arc, la concentration en espèces chimiques etc [42]. On peut ainsi déterminer les différentes géométries du bain de fusion. L'ensemble de ces modèles permettent de décrire au mieux les phénomènes impliqués dans l'opération de soudage. Cependant, aussi riches et complexes soient-ils, ces modèles nécessitent un dialogue permanent avec l'expérimentation, aussi bien pour la confrontation des résultats, que pour la quantification de certaines grandeurs ou l'ajustement de certains paramètres.

L'expérimentation permet en effet l'accès à des grandeurs très variées, à l'échelle locale ou globale, en cours de soudage ou après soudage, comme par exemple :

- la pression de l'arc [104],
- l'énergie délivrée,
- la géométrie [62],
- les températures [64],
- les tensions de surface des gouttes en vol libre (**GMAW**) [105],
- les cellules de convection du bain de fusion [71],
- la géométrie apparente (surface) [76] et la pénétration du bain de fusion [79],
- le rendement des procédés arc [93],
- la position de la surface libre du bain [63],
- l'évolution des déformations de tôles minces au cours du refroidissement [101]
- ...

Cependant, comme on peut le constater dans la littérature, beaucoup de travaux expérimentaux concernent des études de caractérisation mono-problématique. Il apparaît un manque de données globalisées et capitalisées qui pourraient enrichir la description et la compréhension de ces différents phénomènes physiques et comportements mécaniques fortement couplés. En ce sens, le développement d'une approche expérimentale basée sur un outil de mesures multiphysiques peut constituer une voie d'étude complémentaire.

1.5 Conclusion

Ces trente dernières années, des progrès significatifs ont été réalisés dans la compréhension des procédés de soudage mais aussi pour la soudabilité des matériaux. Cependant, certains problèmes clef et pistes d'optimisation restent d'actualité, comme les distorsions pour l'assemblage de tôles minces par le contrôle des sources de puissances (souder plus froid) afin d'éviter le surcoût du traitement thermique post opératoire. La principale difficulté des études qui ont pu être menées, reste la complexité des physiques du soudage, et surtout leurs interactions. Afin de faire des progrès dans cette discipline, il est nécessaire de développer l'acquisition de données expérimentales, tels que des champs de température, la géométrie du bain, les mesures des contraintes résiduelles, tout en couplant ces données, dans le but de définir leur sensibilité réciproque puis de définir et d'explorer des voies d'optimisation des procédés à l'arc. Aujourd'hui la principale zone difficile d'accès et donc de caractérisation est le bain fondu mais surtout ses mouvements de convection. Les raisons à ces limites sont les conditions de mesures sous haute température, mais surtout sous perturbation électromagnétique due à la présence de l'arc électrique ; mais aussi le fait que la zone étudiée ne doit pas être perturbée par l'instrumentation.

Par le biais, de cette synthèse bibliographique, nous pouvons également constater que les expériences comme les simulations ont souvent un caractère mono-problématique (distorsions, procédé). Or aujourd'hui, nous progressons vers des modèles couplés Arc/Bain pour le GTAW, Arc/Transfert/Bain pour le GMAW. Mais cette volonté est bridée par des connaissances et des expériences aux interfaces de ces domaines encore trop pauvres.

Dans l'idée de contribuer à l'amélioration de ces connaissances, nous avons choisi de construire et de développer une approche expérimentale multiphysique dédiée aux procédés à l'arc sous flux gazeux. Nos objectifs sont une meilleure compréhension du procédé pour l'optimisation d'un large champ d'applications, tout en constituant une base de données expérimentales multiphysiques (procédé, thermique, mécanique, optique, acoustique, etc.) robuste, pérenne, pouvant nourrir la simulation numérique du soudage tant pour la validation que pour le calage des modèles. Enfin, compte tenu de l'émergence des méthodes de contrôle des procédés en cours de soudage, notre dernier objectif sera de proposer des pistes par le biais d'études de faisabilité pour détecter les défauts en cours de soudage.

Pour répondre à ces objectifs, il est nécessaire de développer un outil expérimental multiphysiques et multiprocédés à arc (**Procédés à Arc Sous Flux Gazeux, PASFG**) et en connaissance du milieu hostile qui est celui du soudage, une étude sur l'instrumentation est engagée au chapitre suivant.

Chapitre 2

Instrumentations en soudage

2.1 Introduction

L'état de l'art du soudage (chapitre 1) laisse apparaître un besoin de mesures en soudage à l'arc, à la fois pour des études de caractérisation expérimentale, mais aussi pour alimenter et/ou valider la simulation numérique. En effet, les informations expérimentales sur la dynamique des procédés en cours de soudage comme l'évolution de la géométrie du bain de fusion, la cinétique des mouvements de convection du bain de fusion et bien d'autres, sont nécessaires à la fois pour la compréhension des mécanismes physiques induits, l'enrichissement des modèles numériques, et le contrôle d'une opération de soudage à l'arc. Aujourd'hui, il existe de nombreuses techniques de mesures non intrusives associées à du matériel d'acquisition de données très performant. Des exemples typiques sont les caméras numériques rapides et les cartes à grande fréquence d'échantillonnage (bande passante = 250 kHz) [106]. Il faut garder à l'esprit que ces outils de mesures sont en constante et rapide évolution mais également que l'accès aux quantités pertinentes peut se faire par des mesures de type local ou global. Ce chapitre constitue la première étape pour répondre au triple objectif : compréhension, validation et contrôle pour les procédés à l'arc, en proposant un choix d'instrumentations synchronisées pour une plateforme expérimentale multiphysique dédiée à l'étude du soudage à l'arc et ses applications.

Le développement d'un outil de mesures passe par une étude de l'environnement de mesures puis par le choix des instrumentations [107]. Dans le cadre de ce travail sera présenté le développement d'une plateforme d'acquisition ou centrale d'acquisition. Une centrale d'acquisition est composée de chaînes d'acquisitions pour chaque catégories de mesures (températures, efforts, courant, etc.). Une chaîne d'acquisition recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé. Elle se décompose en trois étages, capteur, conditionneur et échantillonneur [107; 108; 109] (figure 2.1).

La pluridisciplinarité des techniques impliquées dans le soudage complexifie l'instrumentation à mettre en œuvre pour réaliser des mesures multiphysiques. Les dynamiques du bain de fusion, ou celles des distorsions au cours du procédé se produisent par exemple avec des temps caractéristiques très différents. L'étude des couplages entre physico-chimie de l'arc et du bain de fusion avec la thermique et la mécanique de l'assemblage, constitue un fort intérêt pour la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Pour cela, l'accès aux informations de type cinétique d'écoulement, température, effort, est pertinent lorsqu'on les couple aux paramètres procédé. Les phénomènes mis en jeu vont donc mettre plus ou moins de temps à se manifester, mais leur confrontation est nécessaire, d'où l'intérêt d'avoir une base de temps commune à toutes les données mesurées. De cette volonté, émerge une caractéristique capitale pour le développement de la centrale d'acquisition qui est la synchronisation de tous les moyens de mesures.

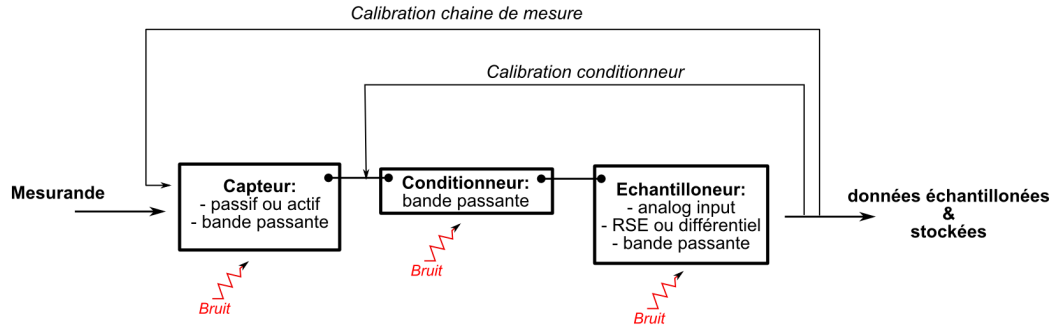


FIGURE 2.1 – Définition généralisée d'une chaîne de mesure

D'autre part, la mise au point d'une chaîne d'acquisition pour effectuer des mesures dans le cas du soudage à l'arc est assez délicate et nécessite des précautions particulières. L'objectif est de s'assurer de la qualité de la mesure (validée en caractérisant l'étendue des mesures, la précision, la résolution, la rapidité et l'immunité aux grandeurs d'influence de l'environnement de mesure) et donc de s'affranchir des fréquents problèmes [110] (retour d'arc, bruits, sauts de mesure...) dus à l'environnement fortement perturbateur de l'opération de soudage.

Le chapitre s'organise de la manière suivante :

- Présentation de la plateforme d'analyses des procédés.
- Description de l'environnement de mesures, permettant d'avoir des signaux les moins bruités au cours du soudage.
- Types de mesures développés et leur utilité dans le contexte de l'optimisation des procédés.
- Démarche choisie pour synchroniser l'ensemble des données sur la même base de temps.

2.2 Composition de l'outil expérimental

La plateforme expérimentale (figure 2.2) développée au laboratoire est composée :

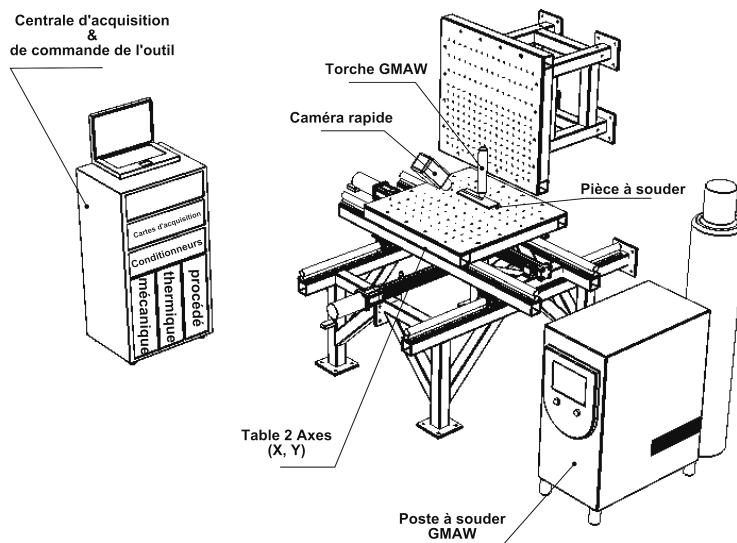


FIGURE 2.2 – Description du dispositif expérimental

1. d'une table XY réalisée par Frédéric Rousselin [111]. Il s'agit d'une table deux axes (X & Y) contrôlée via un programme développé avec le code Labview[®]. Elle a pour caractéristiques d'exécuter tous types de trajectoires avec des vitesses d'avance allant jusqu'à 10 m/min pour des pièces pouvant atteindre une masse de 80 Kg. L'asservissement est totalement programmé afin de pouvoir faire évoluer les vitesses en fonction des retours des capteurs.
2. des procédés à arc GTAW et GMAW qui sont associés à la table XY avec pour particularité d'avoir la torche de soudage fixe afin de faciliter l'observation du procédé (comme par exemple une caméra pour la visualisation du bain de fusion en cours de soudage) et les pièces soudées mobiles. Les postes de soudage utilisés sont un SINCOSALD[®] AC/DC 400 A associé à une torche TIG automatique MEC4 SAF-FRO[®] refroidie par eau et un OERLIKON[®] CITOWAVE 500A synergique. Ces deux postes permettent de créer ses propres synergies. Dans le cadre d'études particulières, il est possible de remplacer les sources en place par des technologies plus spécifiques de type CMT (technologie Fronius[®]), STT (technologie Lincoln Electric[®]) (cf. section 1.2.1.2).
3. et de la centrale d'acquisition.

Le développement de la centrale d'acquisition fait l'objet principal de ce chapitre 2. Il se décompose en trois sections, l'étude de l'environnement, les techniques et la synchronisation de mesures.

2.3 Description de l'environnement de mesures

La présence de l'arc électrique en cours de soudage, extrêmement rayonnant, induit de multiples perturbations, de type électrostatique, électromagnétique, thermique et visuelle. Il existe également d'autres sources de perturbations comme les éclairages, les moteurs électriques, les générateurs de soudage.

Toutes ces perturbations peuvent altérer les mesures à tous les niveaux de la chaîne d'acquisition (capteur, conditionneur, échantillonneur...) et nécessite la mise en œuvre de dispositifs

spécifiques (cage de Faraday, fils tressés, blindage, filtres...) [107; 110]. Dans cette partie, le travail consiste à optimiser au mieux chaque type de mesure, en appliquant les moyens de protection adéquats.

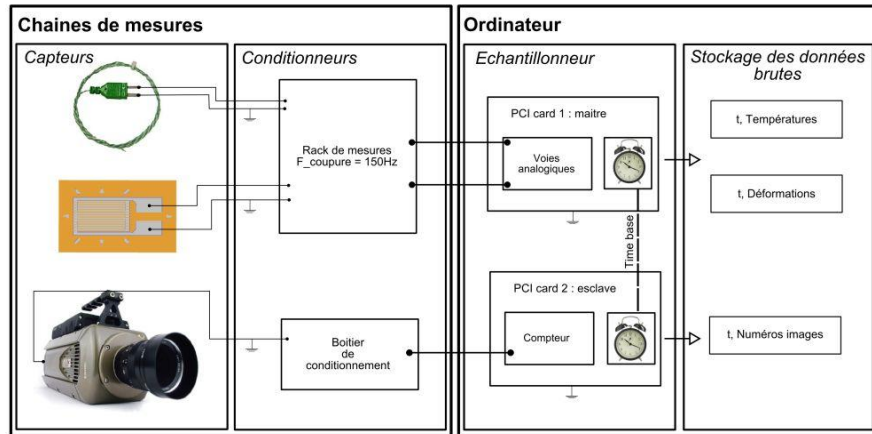


FIGURE 2.3 – Exemple d’une structuration de centrale d’acquisition simplifiée

La figure 2.3 montre un aperçu de tous les niveaux d’une instrumentation pour plusieurs types de mesures. Les principales contraintes auxquelles les chaînes de mesures sont exposées peuvent être identifiées. Les exemples présentés concernent des mesures de températures via un thermocouple, de déformations avec une jauge de déformation et enfin des images du bain de fusion ou d’un transfert métallique avec une caméra rapide. Toutes ces mesures ne nécessitent pas les mêmes fréquences d’échantillonnage. L’exemple de mesure de déformation peut s’exécuter à 20 Hz alors que pour la visualisation du transfert d’une goutte en soudage MIG, une fréquence de 10 kHz sera envisagée. Ces différentes dynamiques pour ces différentes mesures font partie du cahier des charges pour le choix des instrumentations. Par exemple, la confrontation procédé/déformation peut nous aider dans la compréhension du comportement mécanique de l’éprouvette soudée. La solution définie sur le schéma est basée sur le principe d’une synchronisation au niveau des cartes d’acquisition (référence horloge interne de la carte maître câblée avec l’horloge de la seconde carte d’acquisition ou autrement dit : synchronisation matérielle). On présente également l’aspect multi-tâches de l’acquisition de données, par l’utilisation de voies analogiques pour des capteurs tels que le thermocouple ou la jauge de déformation puis un compteur pour repérer les images acquises dans une base de temps commune à l’ensemble de la centrale d’acquisition. Ces différents étages (capteurs, conditionneurs ...) sont exposés à un arc électrique de fort courant qui induit des perturbations de types électrostatiques, électromagnétiques et thermiques. Les deux premières perturbations citées sont les plus classiques en instrumentation. Les solutions standards sont une bonne mise à la terre, l’utilisation de câbles blindés pour atténuer les effets électrostatiques, tressés et protégés amagnétiquement pour les effets électromagnétiques. Les perturbations thermiques peuvent être maîtrisées par exemple en montant les jauges de déformation en demi-pont, ainsi les déformations thermiques sont supprimées. Les longueurs de câbles entre les différents étages doivent être optimisées et les contacts (connecteurs) sans jeux. Les bruits générés par l’arc électrique sur les mesures n’auront pas le même impact sur les signaux. Un signal analogique pour une mesure de tension par exemple, sera moins sensible que celui lié à un compteur. En effet, les compteurs nécessitent un signal particulièrement propre, afin de distinguer clairement les fronts (montant ou descendant) pour le comptage. Le protocole pour la mise au point d’une instrumentation demande une connaissance claire des différents étages de l’instrumentation. Ainsi l’identification du type de perturbation est plus aisée en travaillant du conditionneur vers le capteur. Cette structuration est favorable

également pour la calibration et la gestion des erreurs de mesures.

2.3.1 Perturbations de type électrostatiques et électromagnétiques

Les champs électrostatiques (figure 2.4a) sont dus à la présence d'une tension avec ou sans courant électrique. L'alternance des champs électriques injecte du bruit dans les systèmes de mesures par le phénomène de couplage capacitif. L'éclairage fluorescent est l'une des sources les plus courantes de bruit électrostatique. Les champs magnétiques (figure 2.4b) sont généralement créés par le passage du courant électrique ou par la présence de magnétisme permanent. La variation du champ magnétique génère des parasites (Eq.1.4). Ces deux types de perturbations sont présentes en soudage à l'arc et chacune des solutions préconisées pour la réduction de ces bruits ne sont pas toujours compatibles. Dans cette partie, les techniques utilisées pour réduire les bruits sont montrés. Suivant le type de capteur passif ou actif, le bruit peut être généré soit au niveau du capteur, soit au niveau des câbles, soit au niveau de l'alimentation.

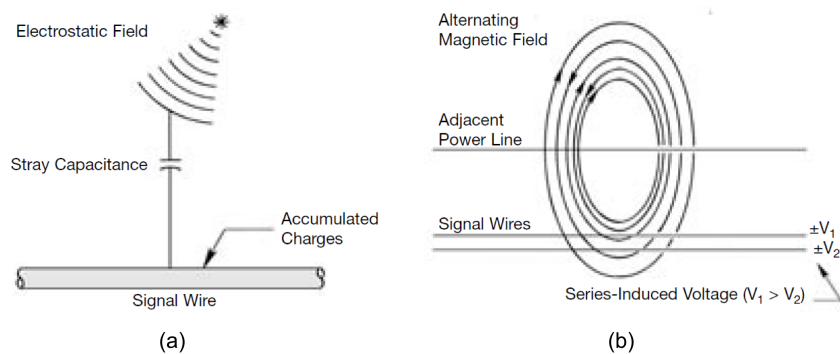


FIGURE 2.4 – a) Bruit électrostatique ; b) bruit électromagnétique [110]

2.3.1.1 Réduction de bruit : techniques classiques

La plus simple et la plus efficace barrière contre les parasites électrostatiques est un écran conducteur, parfois appelé cage de Faraday [110]. Il fonctionne en capturant les charges qui pourraient atteindre le câblage du signal. Une fois collectées, ces charges doivent être évacuées par une mise à la terre (ou potentiel de référence). Si cette solution n'est pas suffisante, il existe la possibilité de coupler le signal du conducteur à une charge capacitive. Lorsque plusieurs instrumentations sont adjacentes les unes aux autres, des problèmes de diaphonies entre les conducteurs peuvent être rencontrés. Dans un environnement proche, les niveaux de bruits peuvent être induits à la fois par un couplage magnétique et électrostatique. Pour remédier à ce type de perturbations la mise à un potentiel commun stable de toutes les instrumentations est fortement recommandée. Les solutions pour réduire les bruits magnétiques sont en général de deux types :

- tressage des fils annulant l'effet des courants induits ;
- protection amagnétique avec un alliage de cuivre-nickel (idem cage de Faraday).

A noter également que la charge capacitive grandit avec la longueur des câbles. Par conséquent, même avec une bonne mise à la terre, du bruit résiduel peut encore exister. La solution est de maintenir une tension constante afin que la différence de tension entre les conducteurs et le blindage soit proche de zéro, la capacité effective est diminuée, et le transfert de bruit est minimal.

Il est important de noter que tous les conducteurs sont caractérisés par une résistance, une inductance ou une charge capacitive. D'où l'attention particulière à la qualité du potentiel de référence, la terre (GROUND). Tous les câblages doivent être tressés, optimisés dans la longueur (pour éviter l'effet d'antenne), et les surfaces des connecteurs doivent être les plus réduites possibles (figure 2.5).

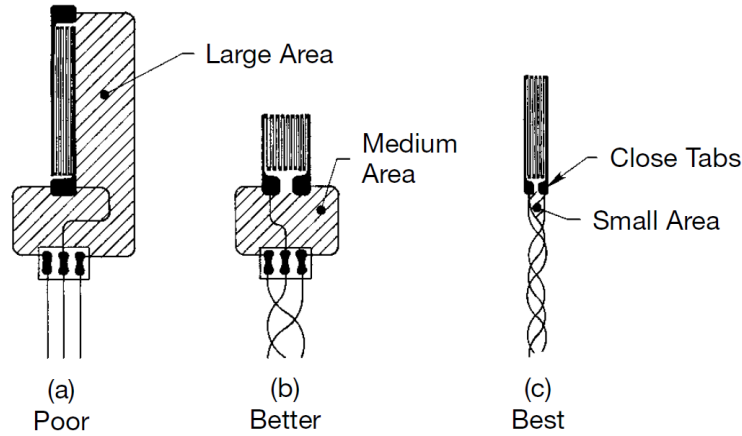


FIGURE 2.5 – Exemple choix de jauge et technique de câblage [110]

2.3.1.2 Réduction de bruit : exemple appliqué à un capteur d'effort

Dans le cadre du développement d'un capteur d'effort en un point de bridage d'une éprouvette soudée en GTAW, nous avons cherché à repérer, quantifier et réduire l'effet des perturbations environnementales sur la mesure.

Le principe du capteur d'effort est basé sur l'utilisation de deux jauges de déformations collées sur une tige dans le plan (x, z) (cf. figure 2.6). Le but est de mesurer uniquement l'effort dans le plan de l'éprouvette (x, y) en écartant les déformations dues à la dilatation thermique de la tige, et le moment au point de fixation (origine du repère), dû au décalage de la source de chaleur vis-à-vis du capteur.

Mesure de F : Les deux jauges sont montées en demi-pont.

$$\epsilon_{mesure} = \frac{\epsilon_a - \epsilon_b}{2} \quad (2.1)$$

Où ϵ_{mesure} est la déformation totale mesurée, ϵ_a la déformation de la jauge (a) et ϵ_b la déformation de la jauge (b).

Si on écrit ϵ_a et ϵ_b , on a :

$$\epsilon_a = -\frac{aF(d/2)}{EI_{gx}} + \frac{M(d/2)}{EI_{gx}} + \epsilon_{thermique} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_b = -\frac{bF(d/2)}{EI_{gx}} + \frac{M(d/2)}{EI_{gx}} + \epsilon_{thermique} \quad (2.3)$$

Où a et b sont les bras de levier respectif aux jauges (a) et (b), F l'effort en bout de tige ; d le diamètre de la tige du capteur, E le module d'Young, M le moment au niveau de la liaison

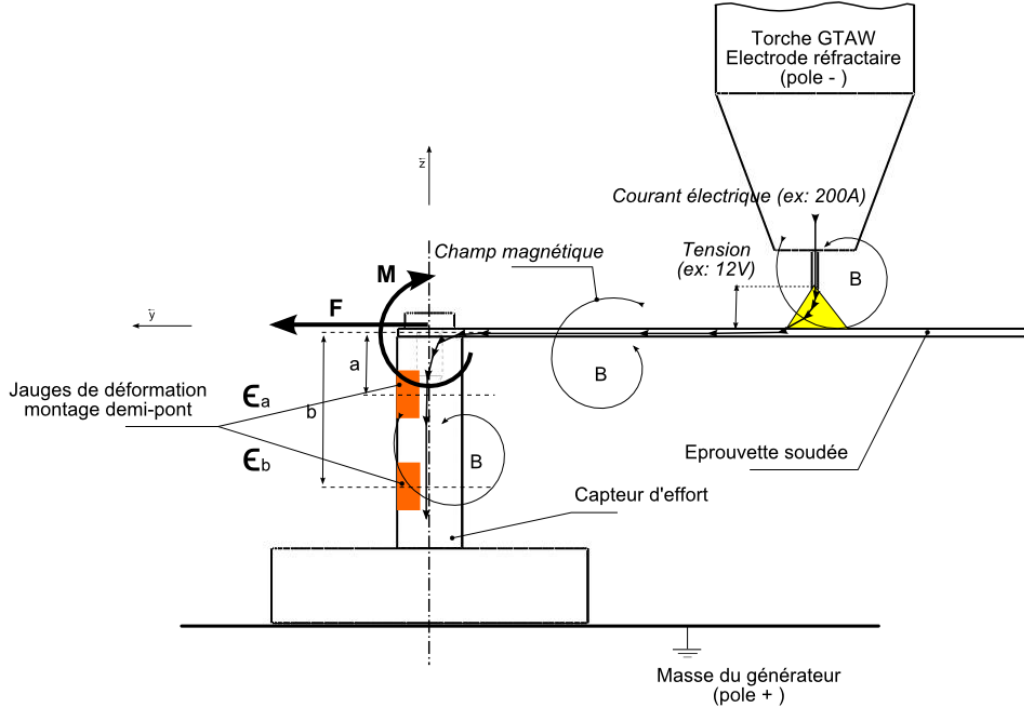


FIGURE 2.6 – Schéma d'un capteur d'effort et de son environnement

et I le moment quadratique de la tige.

En introduisant Eq.2.2 et Eq.2.3 dans Eq.2.1 on obtient :

$$\epsilon_{mesure} = \frac{-\frac{aF(d/2)}{EI_{gx}} + \frac{bF(d/2)}{EI_{gx}}}{2} = \frac{8F}{E\pi d^3}(b-a) \quad (2.4)$$

L'expression de l'effort F en fonction ϵ_{mesure} s'écrit alors :

$$F = \frac{\epsilon_{mesure}E\pi d^3}{8(b-a)} \quad (2.5)$$

La conception de ce capteur d'effort a été étudiée afin de s'affranchir des effets de moment M et de déformation thermique $\epsilon_{thermique}$. Il reste à traiter les effets électrostatiques et électromagnétiques dus à la présence de l'arc caractérisé par une tension et un fort courant électrique (figure 2.6).

Du capteur vers le conditionneur : Le courant électrique passe dans le capteur d'effort. Les jauges sont isolées par la fine couche de colle. Les jauges subissent tout de même les effets de champs [112]. La jauge se décompose entre le circuit résistif (la grille), le support et les cosses de liaison. La résistance varie en fonction de sa déformation, ce qui revient à une variation de potentiel. Les connecteurs de chaque jauge doivent être isolés de la structure du capteur afin d'éviter le court-circuit. La première cage de Faraday est constituée de scotch "cuivre" donc conducteur afin de créer une barrière contre les parasites électrostatiques. Cette barrière est également isolée des cosses toujours afin d'éviter le court-circuit de la jauge. La première cage est mise au potentiel de référence par contact avec la structure du capteur d'effort afin d'évacuer les charges captées. Le capteur d'effort est lui-même recouvert par une seconde cage de Faraday. Les câbles liant le capteur au conditionneur sont tressés avec précaution, les extrémités des fils soudés aux cosses sont dénudées de manière à réduire au mieux l'aire de contact entre la jauge

et le câble (figure 2.5), ceci dans l'objectif de s'affranchir des effets électromagnétiques. Le câble est blindé à son tour par une gaine conductrice mise au potentiel de référence. Le conditionneur a été développé au sein de notre laboratoire par Y. El Kaïm. Ses principales caractéristiques sont une isolation multi-couches des circuits, un optocouplage des voies assurant une isolation électrique entre le capteur et les cartes d'acquisition.

Ces solutions d'optimisation pour cette instrumentation ont été réalisées par étapes. Le cahier des charges était de concevoir et fabriquer un conditionneur comptant 4 voies (par carte) pour une bande passante de 150 Hz , tout en assurant son isolation par rapport à l'environnement hostile du soudage à l'arc. Une fois construit, toutes les voies ont été calibrées (fonction linéaire) grâce à une mesure étalon, pour rendre le conditionneur opérationnel.

Le capteur peut être à son tour calibré. Pour le capteur d'effort, la calibration consiste à appliquer différentes charges étalons à l'extrémité du capteur, et de mesurer le signal de sortie afin d'en déduire la fonction de calibration (dans notre cas, linéaire, soit un coefficient et un offset).

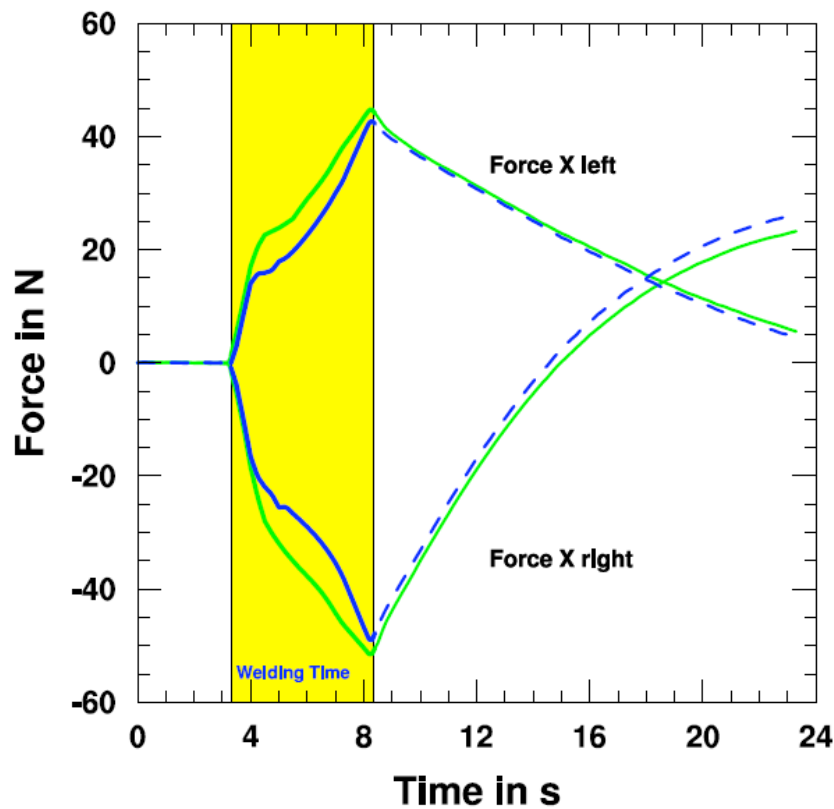


FIGURE 2.7 – Mesures d'efforts de deux expériences répétées [9]

La figure 2.7 présente un exemple de mesure d'efforts répétée (2 tests) avec deux capteurs positionnés en vis-à-vis à chaque extrémité de l'éprouvette soudée. Les signaux sont sans bruits. On ne remarque aucun sauts lors de l'amorçage ou de l'extinction de l'arc électrique. Les niveaux d'efforts atteints et les tendances d'évolution en cours de soudage et lors de la phase de refroidissement de l'éprouvette démontrent une bonne répétabilité des expériences.

2.3.2 Les ondes électromagnétiques

Une attention particulière doit être portée au caractère intensément lumineux de l'arc électrique, qui est également une source de perturbations importantes lorsqu'il s'agit de visualiser le bain de fusion ou le transfert métallique en cours de soudage. Il est en effet nécessaire de prendre en compte le caractère spectral d'un arc électrique GTAW et GMAW. Peu d'études existent au sujet de la caractérisation spectrale de l'arc électrique en soudage [7; 36; 113; 114; 115] (cf. section 1.3.1.3). L'écoulement du courant dans la matière ionisée émet un rayonnement de lumière (dans le visible, l'infra-rouge et l'ultra-violet, cf. figure 2.8) dont le spectre est caractéristique de la nature du gaz, et à un degré moindre, de celle des électrodes dans le cas où ces dernières sont fusibles (métaux de base et d'apport). Dans le cas général, les arcs émettent une grande proportion d'ultraviolet particulièrement agressif pour les yeux. La difficulté est que la nature spectrale de l'arc électrique dépend également de l'énergie de soudage (densité du plasma). Beaucoup de paramètres doivent donc être considérés pour espérer obtenir toutes les caractéristiques spectrales en soudage à l'arc. Ces informations sur le caractère spectral d'un arc électrique sont très intéressantes, afin de repérer des zones d'émissions réduites, c'est-à-dire des longueurs d'ondes pour lesquelles l'arc électrique est moins intense. Connaissant les propriétés spectrales de l'arc, différentes solutions peuvent être envisagées afin de visualiser le bain de fusion au travers l'arc électrique (filtres, éclairages, etc, cf. section 2.4.4).

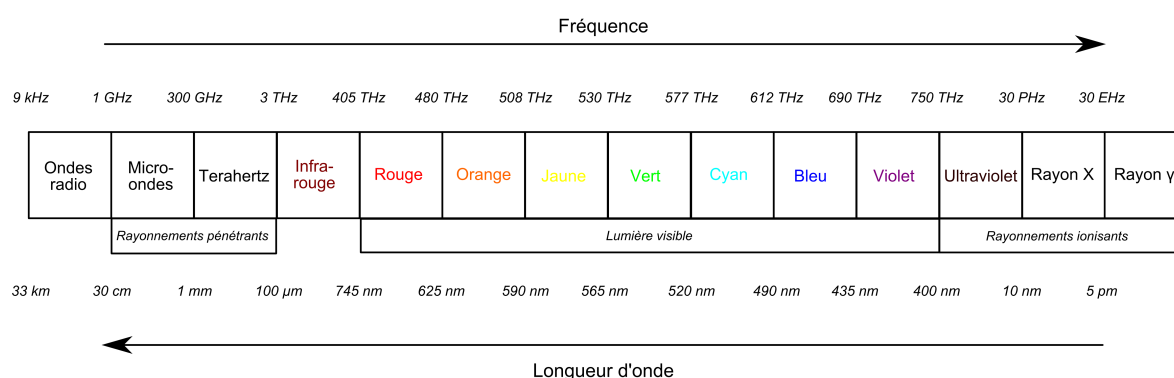


FIGURE 2.8 – Diagramme du spectre électromagnétique [116]

2.3.3 Une source de chaleur

L'arc induit des variations de températures importantes et rapides. Ce mode transitoire thermique est une source de perturbation pour certains capteurs en contact avec l'éprouvette, comme les jauges de déformation (section 2.3.1.2). Ce paramètre perturbateur thermique conditionne le choix de certains capteurs, des colles ou couplants à utiliser pour la mise en position de capteurs (jauges de déformations, thermocouples, accéléromètre), mais également des protections matérielles sur les équipements proches de la source de chaleur comme le verre athermique pour l'optique.

2.3.4 Projections et fumées

Les instrumentations sont exposées aux projections métalliques (principalement en GMAW, mais également aux fumées de soudage. Les fumées de soudage et vapeurs métalliques ont pour défaut de gêner la visualisation de la zone d'intérêt. Pour réduire cet effet néfaste, nous utilisons une hotte aspirante. En ce qui concerne les projections métalliques, les carters de protection, principalement pour la caméra, est le meilleur choix.

2.3.5 Phases d'amorçage et d'extinction d'arc

Les procédés de soudage à l'arc utilisent deux techniques d'amorçage (section 1.2.2.1). Naturellement la technique d'amorçage "lift arc" se présente comme le meilleur choix pour éviter la détérioration trop rapide de l'instrumentation. La plateforme de soudage est conçue pour souder en mode automatique, or le mode d'amorçage "lift arc" a nécessité l'automatisation de l'axe Z, c'est-à-dire celui de la torche de soudage. Ce développement offre également la possibilité ultérieure de réguler la hauteur d'arc en cours de soudage. L'amorçage de l'arc électrique génère un saut brutal de tension, qui induit une variation brutale du champ électrique. Ceci peut expliquer la présence possible de sauts de signaux sur les mesures durant les phases d'amorçage et d'extinction. Les solutions à apporter pour répondre à ces défauts de mesures sont les mêmes que ceux contre les perturbations de type électrostatique et électromagnétique (cf. section 2.3.1). Toutefois, les sauts de tension importants (retour d'arc) peuvent détruire le matériel d'acquisition de données. C'est pour cette raison que l'optocouplage de toutes les voies d'acquisition est fortement recommandé. La solution technique retenue est un optocoupleur qui est un composant ou un ensemble de composants qui permet le transfert d'informations entre deux parties électroniques isolées l'une de l'autre d'un point de vue électrique. La première partie est un émetteur, et la seconde partie est un récepteur.

2.4 Méthodes de mesures développées

Les besoins en mesures sont directement liés à la définition du soudage comme étant une technique pluridisciplinaire (chapitre 1). Etant donné que ce projet de mesures multiphysiques concerne l'opération de soudage, il est nécessaire de développer des techniques de mesures pour les paramètres du procédé, pour les températures de bain de fusion, ou des pièces soudées, pour des efforts de bridage, des déformations dans l'éprouvette mais aussi pour la caractérisation des phénomènes transitoires dans l'arc et le bain de fusion. L'objectif est également de trouver et tester des méthodes pour le contrôle du soudage à l'arc. Le choix des techniques utilisées se fait en fonction de la grandeur physique à mesurer, de sa dynamique et de son échelle (information globale ou locale) pour le système étudié. Les solutions adoptées sont celles qui paraissent le plus adaptées au moment du développement de la centrale d'acquisition.

Suivant le but recherché, on distinguera différents types de mesures. Pour l'aspect contrôle, il convient d'avoir une mesure précise que l'on peut utiliser à distance et dont l'analyse peut être utilisée pour donner des indicateurs de qualité. Aujourd'hui, seules des informations globales (tension, intensité) ne permettant d'apprécier les phénomènes qu'en moyenne, sont largement utilisés. Pour ce qui est de la validation de la simulation, il conviendrait d'avoir des mesures locales pour comparer au résultat des équations aux dérivées partielles mais aussi des gradients. Les mesures de champs seraient alors les plus riches. Malheureusement l'environnement très perturbé de l'arc ne permet que rarement d'avoir des mesures fiables sur un domaine (à l'extinction de l'arc par exemple).

2.4.1 Le procédé : énergie à la source

Les paramètres essentiels des procédés à l'arc sont d'abord ceux d'un arc électrique : le courant électrique (I), la tension de soudage (U) ; ensuite dans le cas du soudage GMAW, la vitesse fil (V_{fil}) qui est étroitement liée au courant de soudage, et pour finir le débit du gaz de protection. Ce sont ces quatre derniers paramètres qui donnent accès aux informations sur l'état du procédé en cours de soudage, mais également à l'énergie à la source. L'énergie à la source est une donnée importante car elle conditionne en grande partie l'élaboration de la soudure. Cette énergie doit être mesurée au plus près de l'arc électrique entre l'électrode du procédé et la pièce soudée. La vitesse de soudage (V_s) est quant à elle, un paramètre procédé acquis au cours du déplacement

de l'éprouvette grâce au retour des codeurs de la table XY [111].

Le courant (I) : L'intensité de soudage est le courant passant entre les pôles du générateur, qui est l'image du courant entre l'électrode et la pièce à souder. Les sources de courant utilisées peuvent délivrer jusqu'à 500 A avec des régimes très dynamiques tel qu'un pulsé à 400 Hz. Cette quantité est mesurée de manière globale. Elle permet d'avoir une idée du flux d'électrons mis en jeu dans le plasma.

La tension (U) : En règle générale, une tension d'arc en TIG peut varier entre 6 et 20 V, alors qu'en MIG, on atteint 40 V dans le cas le plus énergétique. La dynamique de la tension est directement liée à celle de l'intensité de soudage. Pour l'assemblage de pièces en alliages d'aluminium, on peut être amené à utiliser des courants alternatifs. La tension à mesurer sera alors négative pendant la phase de décapage de l'alumine. Durant les phases d'amorçage de l'arc, la tension à vide est importante, de l'ordre de 80 V.

La tension d'arc est également un objet d'étude important dans la mesure où elle est l'image de la hauteur d'arc (distance électrode/surface bain de fusion). La mesure de la tension permet ainsi d'accéder à une information locale caractérisant l'état de l'opération d'assemblage, ce qui peut être très intéressant dans l'optique de contrôle du procédé. C'est une mesure macroscopique qui couplée à l'intensité permet d'apprécier l'énergie mise en jeu dans le plasma.

Le débit de gaz : Le flux gazeux est un élément procédé important assurant à la fois la création d'un plasma d'arc et la protection de la soudure, par le choix de la composition du gaz et du débit. La nature du gaz (argon, CO₂, mélange...) varie selon les matériaux, la position des pièces à souder, et les densités et chaleurs spécifiques peuvent être très différentes, ce qui a une incidence sur le débit de gaz réel. Cette mesure permet le contrôle de la bonne alimentation en gaz du plasma et de connaître, de manière macroscopique, la quantité de gaz instantanée mis en jeu. Aussi, elle permet de s'assurer de la bonne répétabilité des essais.

La vitesse fil (V_{fil}) : En soudage MIG-MAG, le paramètre maître est la vitesse fil V_{fil} . Ce paramètre lie à la fois l'intensité de l'arc et le volume de métal d'apport dévidé (chapitre 1). En règle générale, la vitesse de dévidage du fil est constante et peut varier de 3 m.min⁻¹ à 30 m.min⁻¹. La vitesse fil donne une information globale sur le dépôt de matière dans la soudure qui avec la conservation de la masse est un facteur important de la dynamique des bains de fusion. Aussi, cette quantité est intéressante en contrôle afin d'observer la régularité du dévidage du fil. Enfin, elle est importante pour vérifier la répétabilité des expériences.

Les différentes solutions technologiques retenues pour ces différentes mesures et les dispositions particulières relatives sont détaillées en annexe A. Les principales caractéristiques de ces solutions sont synthétisées dans le tableau 2.1.

Ces instrumentations permettent d'effectuer les mesures des paramètres procédés en adéquation avec les caractéristiques des grandeurs mesurées, aussi bien en terme de plage de variations des grandeurs que de dynamiques des phénomènes (gammes de mesures et bandes passantes des chaînes de mesure suffisantes). Sur chaque voie de mesure, aux différents étages de la chaîne de mesure, les différentes précautions inhérentes à l'environnement de mesure difficile du soudage ont été prises en compte : blindage, cage de Faraday, optocouplage... comme le détaille l'annexe A.

TABLE 2.1 – Synthèse des choix technologiques mis en œuvre pour l'instrumentation du procédé

Type de mesure	Intensité I	Tension U	Débit gaz	Vitesse fil
Fréquence phénomène	400 Hz	400 Hz		200 Hz
Plage amplitude	500 A	-100 V à +100 V	30 l/min	3 à 30 m/min
Matériel	LEM [©]	Câbles	Débitmètre BRONKHORST [©]	Tachymètre HKS [©] DV25 M
Bande passante	150 kHz	250 kHz	100 Hz	10 kHz
Signal sortie	$\pm 10V$ avec résistance	pont diviseur $\pm 10 V$	$\pm 10 V$	0-5 V
Conditionnement	voie analogique	optocouplage		
Remarque	capteur passif	capteur actif	capteur actif	capteur actif

2.4.2 La thermique : énergie transmise

En complément de la mesure de l'énergie à la source, il est nécessaire d'accéder à des informations permettant de caractériser l'énergie transmise à l'assemblage soudé, en particulier pour vérifier l'intégrité du matériau. Le couplage des instrumentations procédé et thermique permet ainsi d'estimer le rendement des procédés. De plus, la thermique des éprouvettes soudées comme celle du bain de fusion sont des données précieuses pour la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu lors d'une opération de soudage, de la phase de solidification et de refroidissement. Ces informations sont utiles pour aborder des problématiques de types distortions, procédé, métallurgique et bien d'autres. A ce jour, les principales techniques connues pour mesurer les températures sont la pyrométrie, la thermographie, et les thermocouples. Plusieurs techniques peuvent être utilisées suivant le type d'information (en un point, mesure locale ou sur l'ensemble de l'éprouvette, mesure de champ) et la localisation de notre zone d'intérêt vis-à-vis de la source de chaleur.

2.4.2.1 Thermocouples

Une des techniques de mesure les plus classiques repose sur l'utilisation de thermocouples. Les thermocouples donnent une information locale et fiable hors des zones à forts gradients, c'est-à-dire loin de l'arc électrique. Les objectifs de cette technique sont d'obtenir un ordre de grandeur de l'énergie transmise à l'assemblage (via des modèles thermiques simples), mais aussi d'identifier des temps caractéristiques de diffusion thermique. Ce capteur est aussi un moyen pour caler et/ou valider la simulation thermique en corrélant sa position avec le modèle numérique. Ce capteur est également utile pour vérifier la répétabilité thermique dans le cadre de campagne d'essais. L'ordre de grandeur des températures mesurées n'excède pas $800^{\circ}C$.

Les thermocouples utilisés sont de type K (plage de mesure de $-200^{\circ}C$ à $1200^{\circ}C$). L'application des thermocouples sur les éprouvettes peut se faire de différentes manières. La première façon, consiste à utiliser des thermocouples non-gainés qui sont soudés au point de mesure (soudure par point ou par décharge capacitive). L'inconvénient de cette technique est la sensibilité du capteur à l'amorçage et l'extinction de l'arc (saut sur le signal). Pour pallier ce défaut induit par la fluctuation du potentiel, il peut être intéressant d'utiliser des thermocouples gainés qui

sont moins sensibles aux perturbations causées par le procédé. Cependant, leur précision est moins bonne du fait du contact indirect des extrémités du capteur. Malgré tout, l'utilisation de thermocouples gainés sans couplant (epoxy) est plus adaptée au milieu fortement perturbateur du soudage à l'arc.

Le conditionnement des signaux est assuré par des cartes spécifiquement développées au sein du LMGC par Y. El Kaïm. Chacune des cartes a une bande passante de 150 Hz et se compose de quatre voies. Comme les cartes jauges (section 2.3.1.2), les cartes thermocouples ont une isolation multi-couches des circuits contre les effets de surtensions, un optocouplage des voies afin d'isoler électriquement l'étage capteur de l'échantillonneur. Les voies thermocouples sont toutes reliées au potentiel de référence. Cette chaîne de mesure permet d'utiliser une fréquence d'acquisition par thermocouple de l'ordre de 35 Hz (bande passante du conditionneur / nombre de voies). L'échantillonnage se fait en RSE¹ avec une carte NI[®].

2.4.2.2 Caméra proche Infra-rouge

Afin d'accéder à la cartographie thermique d'une éprouvette soudée, le recours à une technique par mesure de champs (ou globale) est nécessaire. On peut alors parler de thermographie. Pour cela, on utilise une caméra infra-rouge (IR) étalonnée (grâce à des mesures locales via des thermocouples) et apte à conserver cet étalonnage au cours du temps. La caméra IR mesure un flux de rayonnement. Les températures sont déterminées en prenant en compte les grandeurs d'influence telles que l'émissivité et la température de l'environnement (figure 2.9). La présence de l'arc extrêmement rayonnant et variable est un élément perturbateur important, ce qui explique que cette technique est peu utilisée en soudage à l'arc. La thermographie est en effet une technique assez complexe mais qui présente divers avantages : pas de perturbation de la surface observée, possibilité de mesure sur des objets de température élevée, grande vitesse de réponse. Les principaux inconvénients de ces mesures sont qu'elles ne fournissent qu'une température apparente (en première utilisation) et que les caméras de thermographie restent fragiles et chères. Dans une première approche, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Rotroux et al [117; 118]. Ils ont développé des outils de thermographie à moindre coût. Pour cela, ils utilisent une caméra proche Infra-rouge (NIR) associée à un modèle radiométrique. Dans un premier temps nous cherchons à mesurer les températures en face envers de l'éprouvette ou à l'arrière du bain de fusion en s'isolant du rayonnement de l'arc (écran noir) ou encore du bain de fusion après l'extinction de l'arc électrique. L'accès aux isothermes du bain de fusion en cours de soudage à travers l'arc électrique n'est pas envisagé. L'idéal serait une instrumentation étalonnée sur une gamme de température entre 300°C et 1500°C .

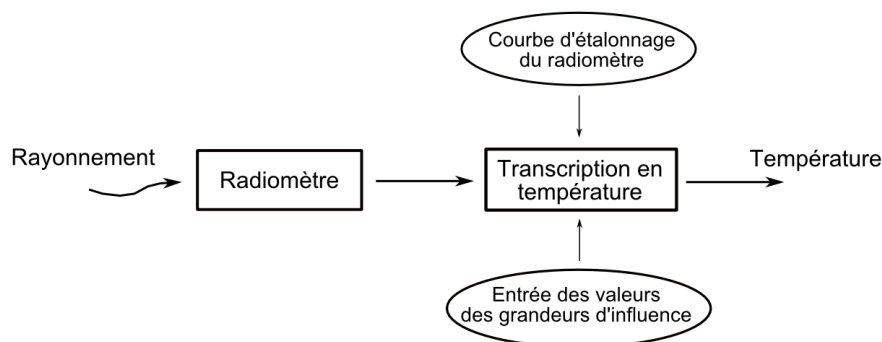


FIGURE 2.9 – Schéma de principe d'une caméra thermique IR

1. *Referenced Single Ended*, où le potentiel de référence est branché à la terre

La caméra utilisée est une caméra NIR CCD² AVT MARLIN[©] de référence F-131B/C dont la dynamique du capteur est de 10 bits. La fréquence d'acquisition est de 30 i.s^{-1} . Le modèle considéré est un modèle radiométrique du premier ordre à 3 paramètres [117] (Eq.2.6). Le modèle est basé sur des principes physiques (loi de Planck ou approximation de Wien) et est inversible. Il est valable pour des atmosphères "propres", d'épaisseur inférieur à deux mètres. Aussi, il est admis que l'atmosphère est transparente et n'a pas d'influence sur la mesure de température (fumées de soudage). Les paramètres sont liés à la physique du système de mesure et sont indépendants des temps d'intégration.

$$T = \frac{2 a_1}{-a_0 + \sqrt{a_0^2 - 4 \frac{a_1}{C_2} \ln \left(\frac{I_d}{k_w} \right)}} \quad (2.6)$$

Où T représente une température, k_w dépend des caractéristiques spectrales du système, a_0 , a_1 sont les coefficients permettant de décrire la longueur d'onde effective, C_2 la constante du rayonnement $1.44.10^{-2} \text{ m.K}$ et I_d le signal de sortie d'un pixel [NG]³.

Les paramètres proposés dans la thèse de Rotrou [117] sont valables pour une gamme de température allant de 400 à 1000°C pour un domaine spectral du capteur CCD $\lambda = [300; 1000 \text{ nm}]$. La méthode d'identification de ces paramètres est largement développée dans [117]. Les paramètres identifiés dans cette gamme de température sont :

- $k_w = 2,11 \text{ NG}^{-1}$
- $a_0 = 1,10.10^6 \text{ m}^{-1}$
- $a_1 = -3,02.10^7 \text{ K.m}^{-1}$

Expériences préliminaires : Dans une première approche, nous utilisons les paramètres de Rotrou appliquée à tous les pixels du champ de vision. L'objectif étant de s'assurer de la sensibilité du dispositif aux champs thermiques. La première expérience consiste à chauffer une plaque avec un chalumeau (Flamme oxygène-acétylène). La caméra est centrée en face envers permettant de mesurer le flux de rayonnement émis (expérience dans le noir). Une fois cette image brute traitée avec le modèle radiométrique, différents isothermes apparaissent clairement (figure 2.10).

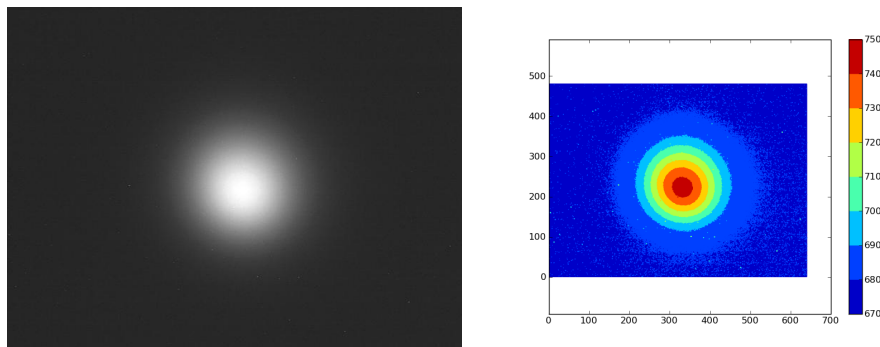


FIGURE 2.10 – a) Image brute en [NG] ; b) Résultat obtenu avec les paramètres de Rotrou

La seconde expérience (figure 2.11) illustre un résultat obtenu à l'arrière d'un bain de fusion GMAW isolé du rayonnement de l'arc par un écran noir. On constate à travers l'échelle de températures que les paramètres du modèle ne sont pas adaptés à cet environnement.

2. Charge-Coupled Device, ou dispositif à transfert de charge
3. Niveaux de Gris

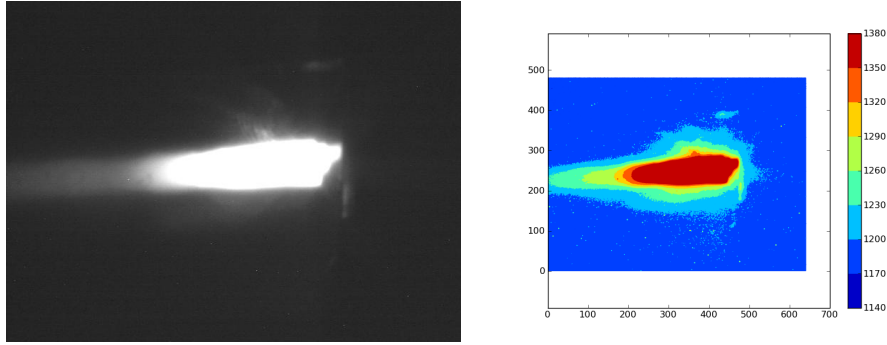


FIGURE 2.11 – a) Image brute en [NG] ; b) Résultat obtenu avec les paramètres de Rotrou

Recherche des paramètres du modèle : L'objectif est de déterminer un jeu de paramètres pour le modèle radiométrique, valide pour des grandes températures de l'ordre de 1500°C . Pour l'expérience, il s'agit d'une opération de soudage stationnaire en GTAW. Le tir est effectué en bordure d'un bloc de S235. On utilise quatre thermocouples pour contrôler et valider le résultat. Leurs positions sont repérées sur la figure 2.12. Afin de s'affranchir du rayonnement de l'arc, une tôle mince est soudée en position d'écran. La caméra NIR enregistre les images sur le champ du bloc soudé.

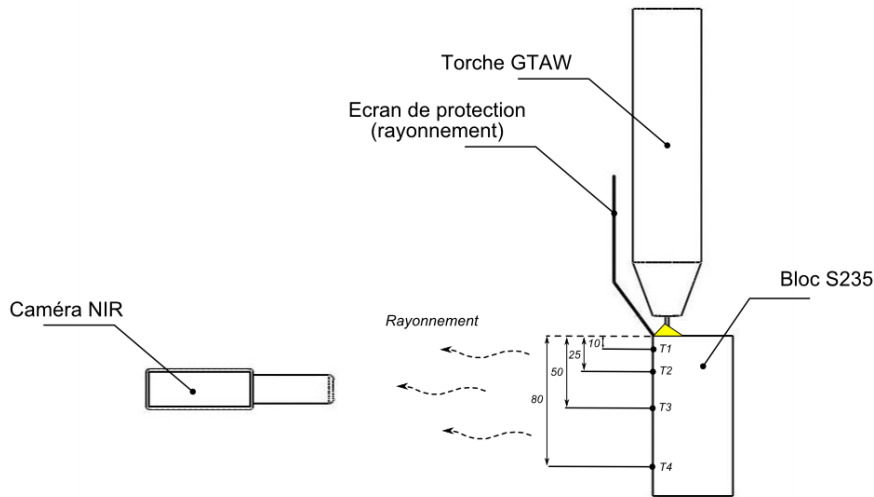


FIGURE 2.12 – Dispositif expérimental pour la détermination des paramètres du modèle radiométrique

Un pixel possède 256 niveaux de gris [NG]. Le modèle radiométrique donne la relation entre une température et un niveau de gris. Dans la figure 2.13 est représentée la gamme de températures couverte en utilisant le premier jeu de paramètres, puis celle avec le jeu de paramètres suivant :

- $k_w = 6, 10^5 \text{ NG}^{-1}$
- $a_0 = 6, 10^5 \text{ m}^{-1}$
- $a_1 = -3, 02.10^7 \text{ K.m}^{-1}$

Le résultat présenté à la figure 2.14, montre une bonne adéquation entre les niveaux de températures mesurés avec les thermocouples (figure 2.14a) puis la caméra NIR (figure 2.14b).

Ces premiers résultats démontrent la faisabilité et l'intérêt de cette méthode de mesure de champs de températures à moindre coût. Il reste tout de même des développements importants pour aboutir à un outil fiable avec une précision acceptable ($\pm 10^{\circ}\text{C}$ suffisant au vue

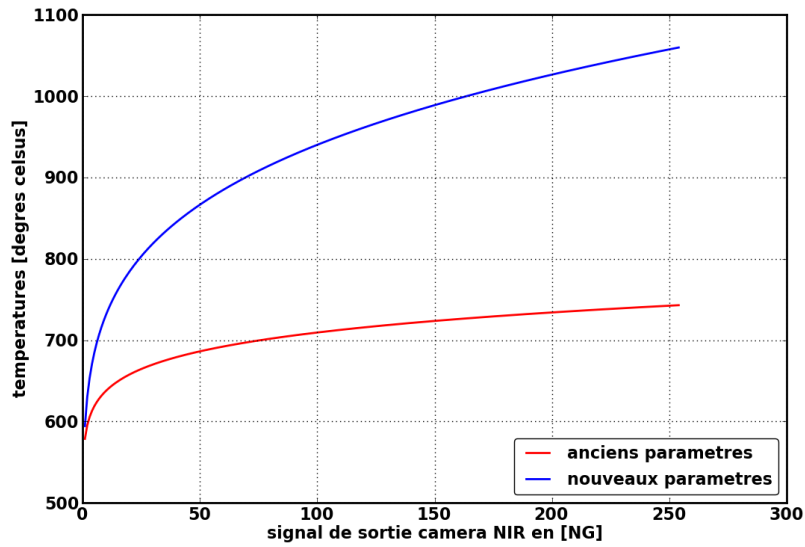


FIGURE 2.13 – Comparaison du modèle radiométrique en fonction des paramètres utilisés

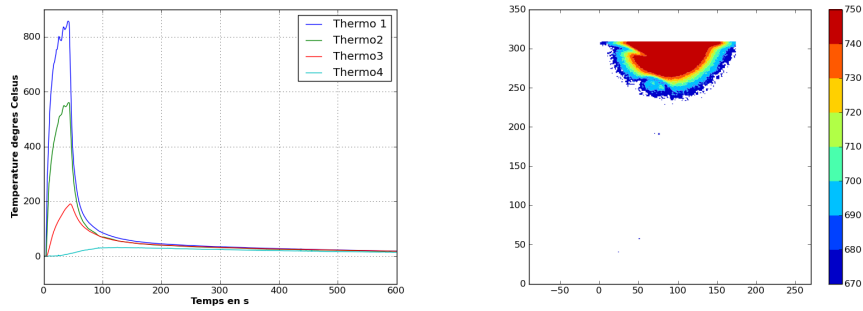


FIGURE 2.14 – a) Signaux thermocouples ; b) Résultat avec les nouveaux paramètres

des températures atteintes). Cette instrumentation sera développée ultérieurement au sein du laboratoire.

2.4.3 La mécanique : déplacements, déformations

Il existe un fort couplage entre la thermique et la mécanique. La connaissance de la thermique donne la possibilité de calculer les contraintes résiduelles au sein de l'assemblage en fonction du matériaux et de la géométrie. Il est intéressant de croiser ce type de résultats avec la mesure de champs de déformations, comme pour la validation de la simulation numérique. La problématique des distorsions induites en cours de soudage peut alors être étudiée suivant le couplage thermique-matériaux-structure.

La mesure des déformations par extensométrie repose essentiellement sur l'utilisation de jauges de déformations (électriques ou optiques, mesure locale) ou de moyens optiques (mesure de champs) [112]. Les jauges ont une sensibilité de 10^{-6} . Les jauges de déformation peuvent donner accès à des déformations locales de l'éprouvette en cours de soudage et de refroidissement ou à des efforts aux points de bridages par l'intermédiaire de capteurs spécifiques. A travers l'exemple de la section 2.3.1.2, on a pu se rendre compte des moyens de protection mis en œuvre contre les effets perturbateurs sur la mesure de type thermique, électrostatique et électromagnétique.

Les mesures de champs sont intéressantes pour la caractérisation de champs de déformations. Comme pour toutes les instrumentations de nature optique, la présence de l'arc électrique en cours de soudage complique leurs développements. Johnson [101] utilise le moiré en face envers pour mesurer le champs de déformations en cours de soudage. L'ordre de grandeur du niveau de déformation à proximité de la soudure est de 10^{-3} [101]. Les jauges donnent une information locale mais permettent d'appréhender les effets de structures.

La mesure de déplacement est en règle générale effectuée par des LVDT⁴. C'est un capteur électrique passif de déplacements linéaires qui donne accès à une mesure locale. Les temps caractéristiques d'évolution des phénomènes mécaniques en soudage à l'arc sont de l'ordre de plusieurs secondes. Les fréquences d'acquisition utiles sont alors de l'ordre de 20 Hz .

Pour des raisons de précision et de coût, nous utilisons des jauges de $350\ \Omega$. Le conditionneur, qui a été rapidement présenté dans la section 2.3.1.2, a été conçu pour des câblages en demi-pont et pont complet (un câblage = 1 voie). La bande passante pour quatre voies est de 150 Hz .

2.4.4 Visualisation : bain de fusion, transfert métallique

L'accès, d'une manière expérimentale avec une caméra rapide, au comportement du bain de fusion et aux transferts métalliques pour les procédés à arc sous flux gazeux est primordial. Les informations qui peuvent être obtenues sont essentielles pour une compréhension fine des mécanismes mis en jeux lors d'une opération de soudage comme pour la validation de modèle numérique (bain/transfert) et le contrôle (monitoring). Cette technique d'acquisition de données par caméra est intéressante dans la mesure où elle permet d'obtenir des informations locales/globales tout en étant non intrusive.

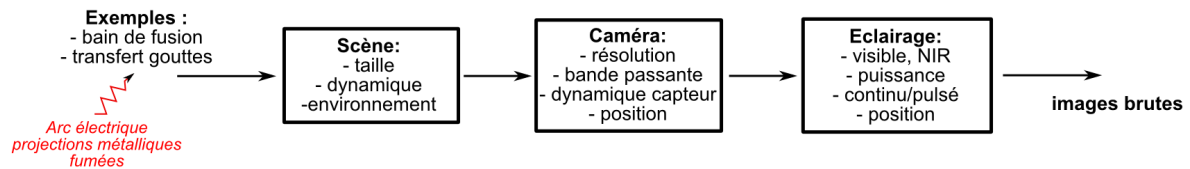


FIGURE 2.15 – principe instrumentation optique

A défaut d'accéder à la cinétique des mouvements de convection du métal liquide dans le bain, une première approche est la détection des frontières liquide/gaz et liquide/solide. L'évolution de la géométrie du bain de fusion au cours du temps selon les paramètres procédé, ou encore le comportement dynamique de sa surface libre (hors plan) permet d'avoir des ingrédients sur les équilibres internes. Les transferts métalliques en soudage GMAW, pour être bien compris, requièrent l'acquisition d'images à travers l'arc électrique soit de gouttelettes en vol libre pour le mode pulsé (détachement, transfert et absorption dans le bain de fusion), soit de transfert par court-circuit (sans vol libre). La visualisation du transfert d'une gouttelette permet par exemple d'accéder à sa géométrie, à la dynamique du transfert, selon la vitesse de dévidage du métal d'apport, le gaz de protection et bien d'autres paramètres opératoires. Dans la section 2.4.1, qui concerne l'instrumentation pour la mesure du courant de soudage (I), il a été défini que ce paramètre, contrôlé par la source de puissance en mode pulsé, pouvait atteindre une fréquence de 400 Hz . En GMAW, cette fréquence de pulsation est de l'ordre de 100 Hz voire de 200 Hz . Ceci implique que la caméra doit être assez rapide pour pouvoir visualiser, dans la configuration la

4. Linear Variable Differential Transformer

plus contraignante, 200 gouttelettes par seconde et également avoir un échantillonnage assez fin pour caractériser au mieux l'évolution de la position de ces gouttelettes (à chaque pulsation) durant leur transfert entre l'électrode fusible et le bain de fusion. Cependant l'utilisation d'une caméra est rendue difficile par la présence de l'arc électrique intensément lumineux, mais également par l'encombrement des parties actives des torches de soudage (buse de protection, corps de torche) pouvant obstruer le champ de vision. L'arc électrique a des propriétés spectrales différentes suivant l'énergie de soudage, la nature et le débit du gaz de protection puis les matériaux de base et d'apport (section 2.3.2). Il rayonne dans le visible, l'infra-rouge et l'ultra-violet. La littérature présente différentes méthodes pour filtrer l'arc, telles que l'ombroscopie pour l'étude des transferts métalliques en GMAW [27; 66; 119], ou par réflexion spéculaire pour la détermination de la géométrie du bain de fusion en GTAW [4; 78; 120; 121] associées à une caméra rapide (environ 4000 i/s ou fps⁵). Pour chaque scène étudiée, des techniques spécifiques sont à mettre en œuvre, intégrant les éléments : zone d'intérêt/caméra/éclairage (figure 2.15). En effet, le développement d'une technique dépend premièrement de la zone d'intérêt à observer (bain ou transfert), ensuite suivra le choix de la caméra (Résolution, fréquence d'acquisition) en fonction des propriétés dynamiques et spectrales, et de la taille de la scène puis la nature et la puissance de l'éclairage selon les propriétés du capteur de la caméra (dynamique, réponse spectrale).

Pour l'instrumentation optique, nous utilisons une caméra PHANTOM[©] V5.0 couleur, pouvant atteindre une fréquence d'acquisition de 10 kHz ou fps pour un champ visuel de 256 x 256 pixels (1 kHz en pleine résolution, 1024 x 1024 pixels). Cet outil, équipé d'un capteur CMOS⁶, donne la possibilité de travailler dans le visible et le proche infra-rouge (NIR).

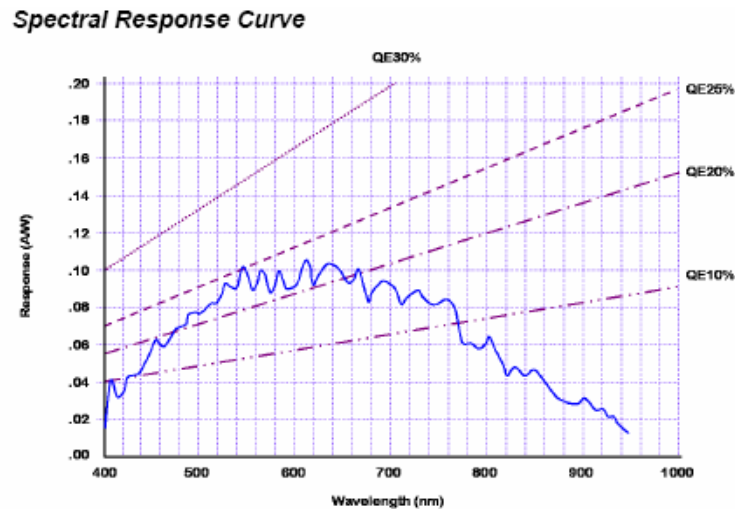


FIGURE 2.16 – courbe de la réponse spectrale de la caméra PHANTOM[©] V5.0

Sur la figure 2.16, nous constatons une meilleure sensibilité du capteur de la caméra dans le visible que dans le proche infra-rouge. Cette propriété du capteur CMOS a pour conséquence d'agir sur le temps d'exposition des images acquises et donc directement sur la fréquence d'acquisition. D'un point de vue théorique, si le choix est fait de travailler dans le proche infra-rouge, donc un domaine spectral pour lequel la caméra est peu sensible, il est nécessaire d'utiliser un grand temps d'exposition et donc une faible fréquence d'acquisition.

En fonction des zones d'intérêt (bain de fusion, transferts...) et des propriétés de la caméra,

5. fps : frames per second

6. CMOS :Complementary Metal Oxide Semi-conductor

quatre méthodes différentes sont mises en œuvre :

1. auto-éclairage ;
2. réflexion spéculaire : mode continu ;
3. réflexion spéculaire : mode pulsé ;
4. ombroscopie.

Quelle que soit la méthode optique utilisée, l'utilisation de la caméra nécessite des phases de réglage⁷ qui ne sont volontairement pas détaillées ici.

2.4.4.1 Auto-éclairage (FIBE)

L'arc électrique est ici utilisé comme source d'éclairage, afin de visualiser le bain de fusion. Il s'agit de travailler avec différents filtres à bandes étroites, suivant le procédé, la gamme d'énergie d'utilisation, le matériaux et le gaz de protection. La difficulté est de connaître de façon précise la fenêtre spectrale d'émissivité de l'arc électrique pour chaque configuration de soudage (cf. section 2.3.2). On détermine les différents filtres interférentiels à bande étroite en repérant les zones d'émission lumineuse moins intense dans les fenêtres spectrales des arcs électriques. D'après la littérature [113; 36], il est possible d'identifier certaines longueurs d'ondes intéressantes pour les configurations les plus conventionnelles (tableau 2.2).

	470 nm	600 nm	650 nm
<i>procédé</i>	GTAW	GTAW/GMAW	GMAW
<i>métal de base</i>	S235/304L	S235	S235
<i>Energie</i>	basse/moyenne	haute	haute

TABLE 2.2 – tableau de synthèse de longueurs d'ondes à émission électromagnétique réduite selon le procédé, le métal de base et l'énergie à la source

Cette méthode (figure 2.17) est la plus simple et la plus souple en terme de mise en œuvre, car elle se réduit à l'utilisation d'un filtre solidaire de l'objectif de la caméra. Cependant elle se limite à des applications en courant "lisse" (DC). Cette technique est moyennement adaptée aux régimes de courant pulsé (DC) et alternatif (AC) (variation de luminosité en cours de soudage) si on ne prend pas garde à synchroniser l'acquisition d'images en fonction de l'état du procédé.

Les images présentées ci-dessous concernent un bain de fusion GTAW pour deux énergies linéaires à un instant de leur évolution rectiligne. On constate malgré tout la présence d'un arc résiduel, mais on distingue bien les limites du bain de fusion pour les deux images présentées et aussi les particules oxydées en surface qui semblent suivre les mouvements de convection en surface (cf. figure 2.18 et 2.19).

Cette méthode ne demande pas de précautions particulières, et elle est rapide à mettre en œuvre. Le plus délicat reste le choix du filtre à bande interférentiel. A noter, que cette méthode atteint ses limites, pour une application sur cible (bain stationnaire), du fait de la présence d'un nuage de vapeurs métalliques (effet brouillard).

2.4.4.2 Réflexion spéculaire : mode continu (NIR-C)

Dans le but de visualiser le bain de fusion, on peut s'affranchir du rayonnement de l'arc en utilisant le principe de la réflexion spéculaire (lois de Snell-Descartes) avec un éclairage additionnel (faisceau concentré). La réflexion est dite spéculaire lorsque le rayon incident donne naissance

7. Réglage des gains du capteur, étalonnage des niveaux de gris des pixels...

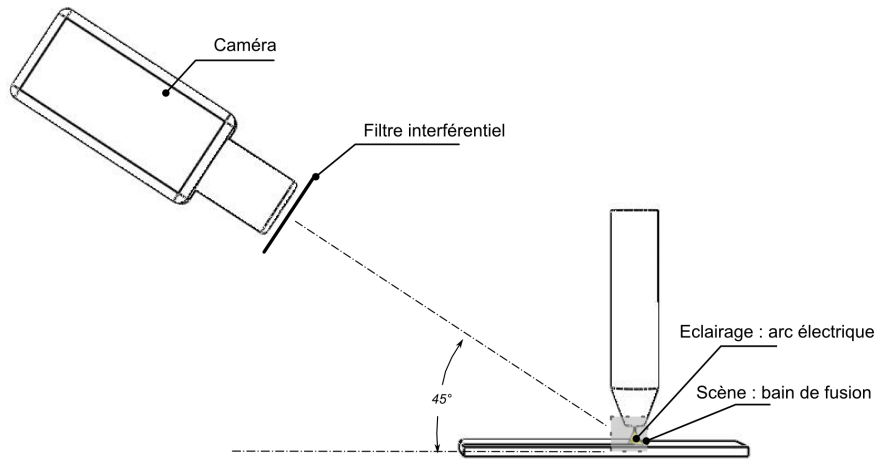


FIGURE 2.17 – utilisation de filtre interférentiel à bande étroite, "méthode FIBE"

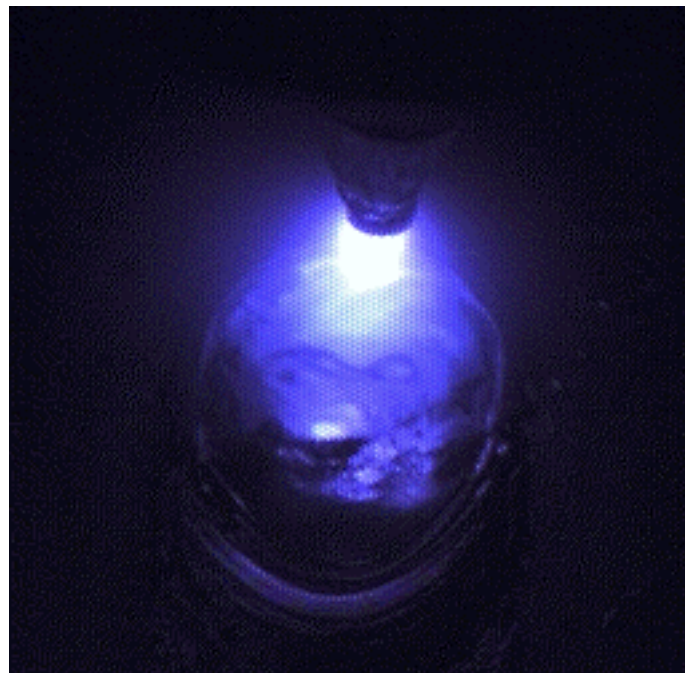


FIGURE 2.18 – image extraite d'une vidéo obtenue avec un FIBE (470 nm)

à un rayon réfléchi unique. Idéalement, l'énergie du rayon incident se retrouve totalement dans le rayon réfléchi, en pratique une partie de l'énergie peut être absorbée ou diffusée au niveau de l'interface. On utilise ce principe de réflexion en soudage avec une source laser de longueur d'onde 808 nm (NIR). L'arc électrique rayonne peu pour ces fréquences d'ondes électromagnétiques. La caméra répond dans le domaine proche infra-rouge. La caméra est positionnée dans la direction de l'angle des rayons réfléchis (opposé mais proche de l'angle incident). Un filtre calé sur la même longueur d'onde que la diode laser est utilisé, ainsi la caméra capte uniquement les rayons réfléchis par la surface du bain de fusion (zone d'incidence = scène, figure 2.21).

En pratique, cette méthode demande un positionnement du collimateur assez fin vis-à-vis

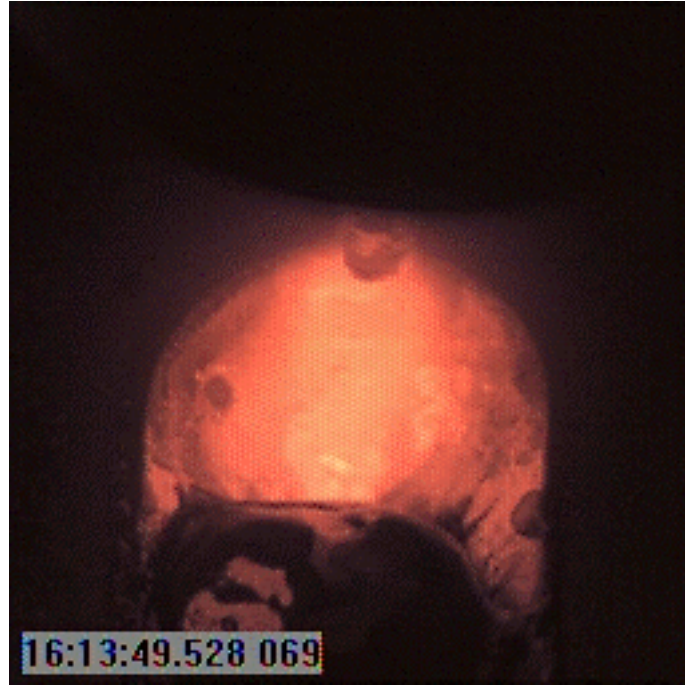


FIGURE 2.19 – image extraite d’une vidéo obtenue avec un FIBE (650nm)

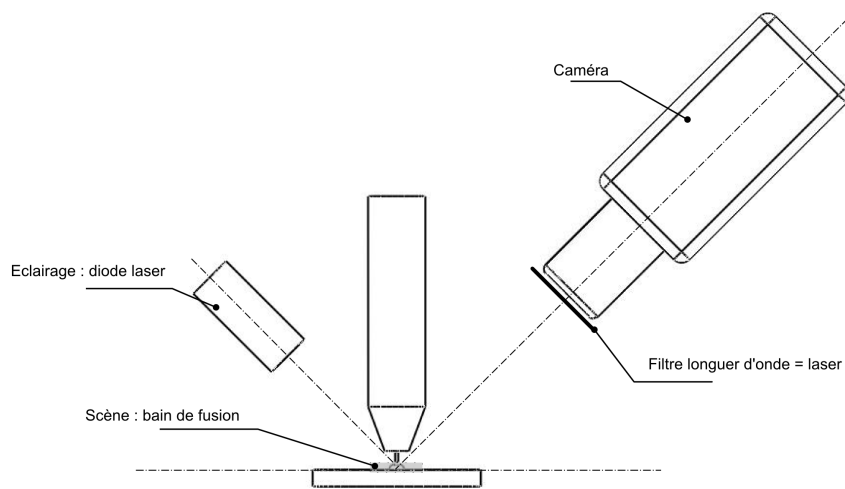


FIGURE 2.20 – dispositif expérimental : réflexion spéculaire

du capteur de la caméra. Il suffit d’un décalage de quelques degrés par rapport à l’angle des rayons réfléchis pour ne plus voir la scène. Cette sensibilité géométrique est aussi liée à la faible intensité de la réponse spectrale du capteur CMOS dans le domaine NIR. Cette caractéristique a également un effet de bridage sur le paramétrage de la caméra pour l’acquisition des images. Pour éviter que les moyens techniques de mesure n’interfèrent avec l’objet/grandeur mesuré, il est nécessaire de limiter l’apport thermique par l’éclairage par diode laser, ce qui conduit à une puissance limitée en mode continu (40 W max). L’association de la dynamique de notre capteur avec la puissance de la diode ne permet pas d’atteindre de grandes fréquences d’échantillonnage (max environ 100 *fps*) car les temps d’exposition sont relativement importants. Ceci exclut l’uti-

lisation de cette technique pour l'étude de transfert en GMAW pouvant aller jusqu'à 200 Hz ou pour l'étude des mouvements de convection en surface du bain de fusion. A noter que l'aspect sécuritaire n'est pas à négliger lorsqu'on utilise une diode laser (lunette de protection).

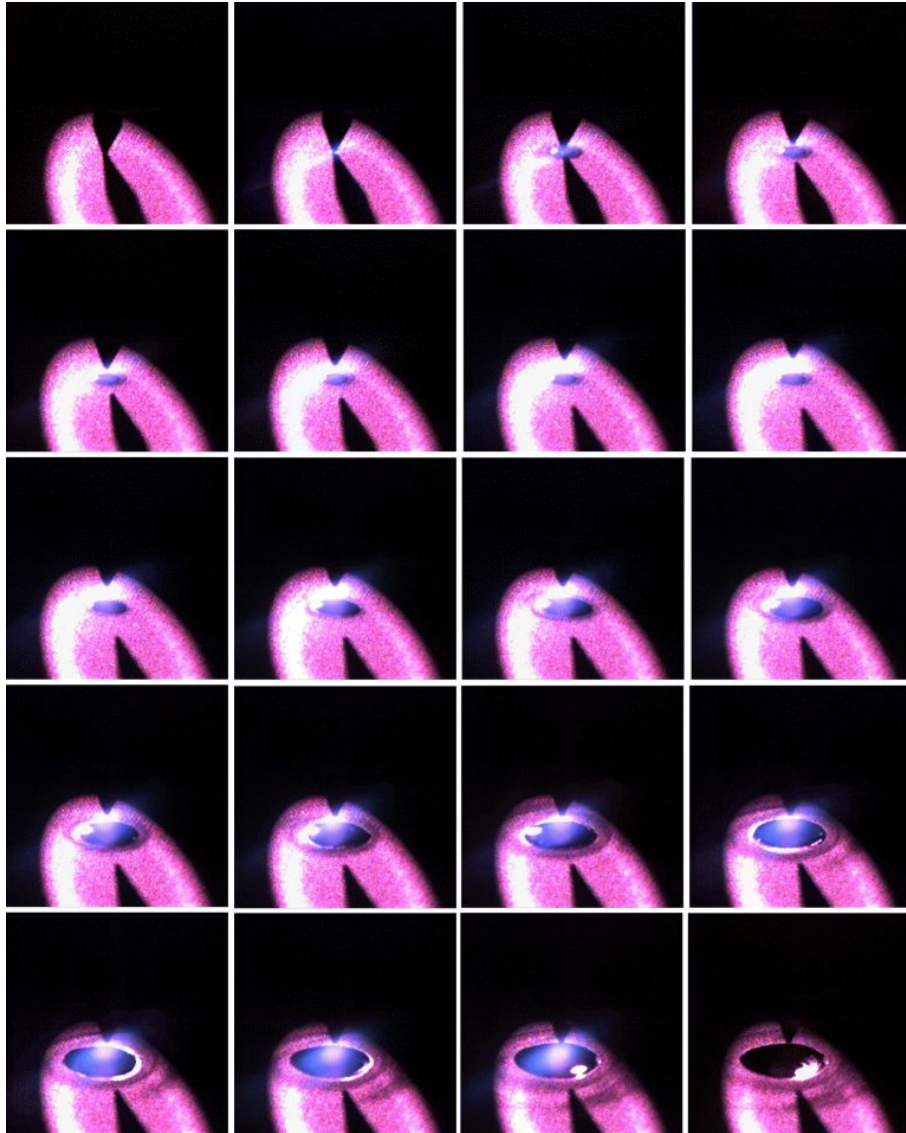


FIGURE 2.21 – images extraites d'une vidéo obtenue avec la diode laser continue

Sur la figure 2.21, on observe un bain de fusion GTAW statique. L'arc électrique est intégralement supprimé de l'image. On distingue très nettement les contours du bain. On remarque des points de concentration lumineuse probablement dus à la réflexion diffuse engendrée par la déformation de la surface libre. La qualité de l'image est appréciable.

2.4.4.3 Réflexion spéculaire : mode pulsé (NIR-P)

Pour augmenter la fréquence d'échantillonnage de la caméra, il est nécessaire de diminuer le temps d'exposition. Cette contrainte nécessite d'optimiser l'éclairage de la source laser afin d'utiliser la méthode par réflexion spéculaire pour la caractérisation de phénomènes très dynamiques (section 2.4.4.2).

D'un point de vue technique, nous utilisons une diode laser pulsée synchronisée avec la caméra rapide. Chaque prise d'image de la caméra est centrée "temporellement" sur la pulsation d'éclairage laser (temps de pulsation de l'ordre de $5\mu s$ pour un temps d'exposition de $10\mu s$ et une fréquence d'acquisition de 11000 fps). Ainsi on arrive à atteindre une puissance crête de pulsation de l'ordre de 400 W tout en maintenant une puissance moyenne équivalente à la diode laser continue soit 40 W . De cette manière nous n'affectons pas thermiquement la zone d'intérêt. Un autre avantage de cette source d'éclairage pulsée est la possibilité d'élargir la zone d'incidence (en modifiant le collimateur), ce qui rend plus confortable la mise au point du dispositif optique. Cette méthode nécessite quelques précautions techniques et sécuritaires. Cette solution optique est cependant très coûteuse (facteur quatre par rapport à la source continue).

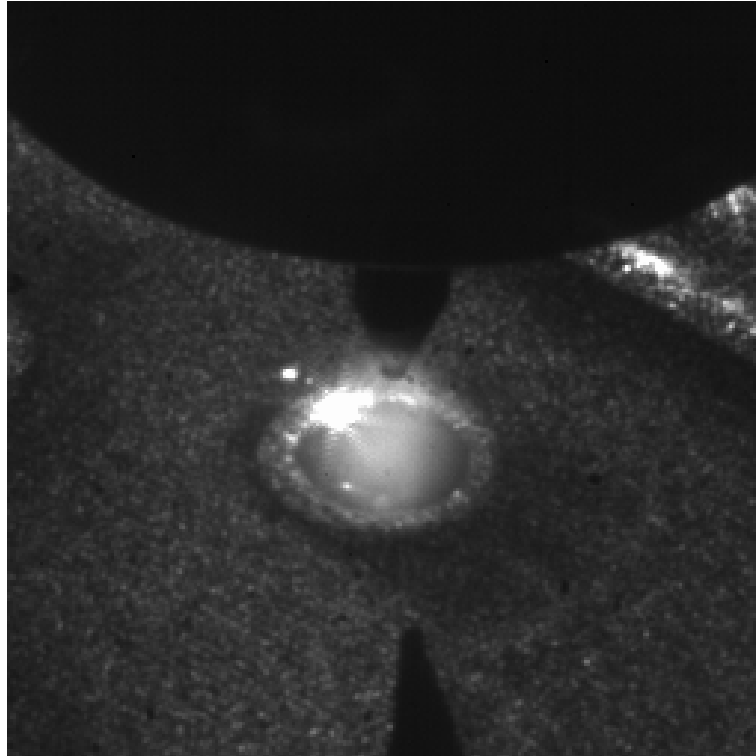


FIGURE 2.22 – images extraites d'une vidéo obtenue avec la diode laser pulsé

La figure 2.22 présente une image extraite d'une vidéo acquise par réflexion spéculaire en mode pulsé. Malgré une fréquence d'acquisition élevée (10000 fps), on constate une qualité d'image équivalente à celle obtenue avec la source continue pour une fréquence d'échantillonnage de 100 fps (figure 2.21).

2.4.4.4 Ombroscopie (Back-Light)

Pour effectuer des mesures par ombroscopie on réalise un éclairage de la zone à étudier par l'arrière à l'aide d'un faisceau lumineux parallèle ou un éclairage diffus, la caméra étant disposée en face, de l'autre côté, afin de filmer l'ombre ou le contour de la zone d'intérêt. Cette méthode est notamment intéressante pour étudier le comportement dynamique de la surface libre d'un bain de fusion en **GMAW** et le transfert métallique de l'électrode fusible. Le dispositif expérimental est présenté à la figure 2.23. Pour nos applications nous utilisons un éclairage diffus (un halogène de 250 W avec un diffuseur). Toujours dans le but de s'affranchir du rayonnement de l'arc sur l'image, la caméra est équipée d'un filtre interférentiel à bande étroite **FIBE**.

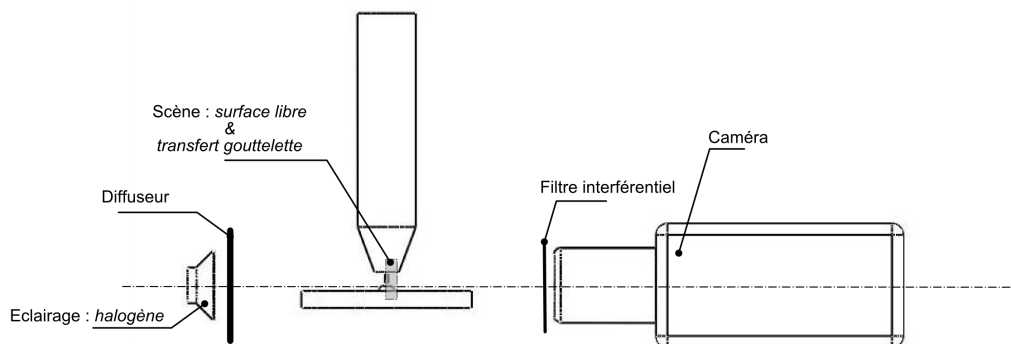


FIGURE 2.23 – dispositif expérimental : ombroscopie

La figure 2.24 montre les possibilités de cette méthode avec un éclairage homogène qui donne un bon contraste. Un dispositif spécifique a été développé pour assurer un éclairage homogène sans interaction thermique (diffuseur, verre athermique, refroidissement à air). Cette technique permet d'atteindre de grandes fréquences d'échantillonnage (10000 *fps*). De cette manière, il est possible d'observer assez finement l'évolution du bain de fusion et du métal transféré.

2.4.4.5 Synthèse

Nous avons présenté quatre dispositifs optiques avec leurs avantages, inconvénients (tableau 2.3) et applications. Une contrainte importante est la qualité du capteur CMOS, en particulier sa dynamique, qui va conditionner le choix des sources d'éclairages.

Code	Mise en œuvre	Précautions	Echantillonnage	Qualité	Coût
FIBE	++++	+	+++	++	+
NIR-C	++	+++	+	++++	+++
NIR-P	+	+++	+++	++++	++++
Back-Light	+++	++	+++	++++	++

TABLE 2.3 – bilan des différentes méthodes optiques

Cette synthèse sur les méthodes de mesure optique montre aussi l'intérêt de connaître les caractéristiques spectrales des arcs électriques pour les configurations de soudage les plus classiques afin d'en déterminer les filtres interférentiels à bande étroite les mieux adaptés. Il est ainsi possible d'envisager tout un ensemble de solutions nouvelles pour améliorer la visualisation du bain de fusion. Comme l'utilisation de grille laser ou de deux caméras (stéréovision) afin d'accéder à des informations géométriques et dynamiques d'ordre tridimensionnelles.

2.4.5 Instrumentations complémentaires

Comme annoncé lors de l'introduction de ce chapitre 2, l'outil développé est conçu pour être évolutif (système ouvert). Il peut donc être enrichi au fur et à mesure en fonction des besoins. On peut penser par exemple à l'utilisation de transducteurs ultrasons pour suivre l'évolution

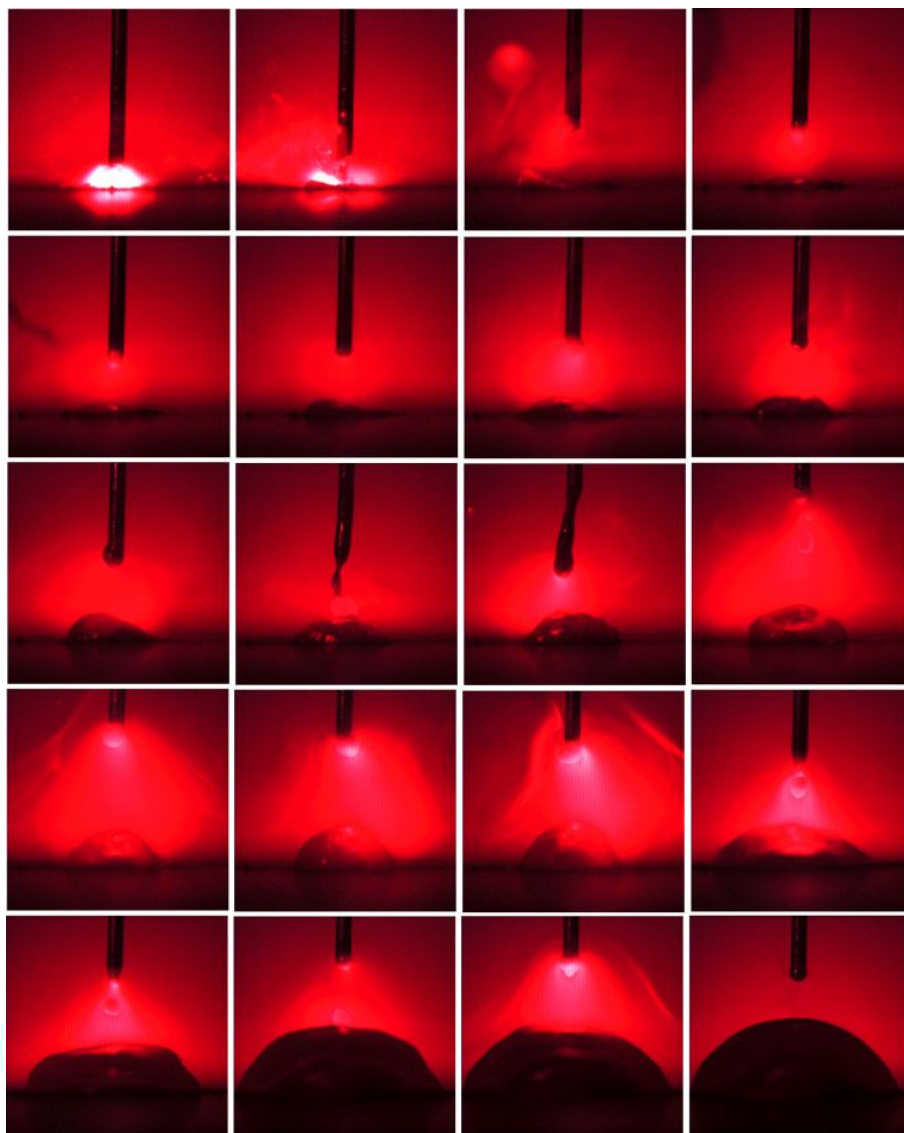


FIGURE 2.24 – images extraites d’une vidéo obtenue par ombroscopie

de la pénétration du bain de fusion (chapitre 1), ou encore d’un microphone afin de traduire l’état de fonctionnement du procédé et bien d’autres instrumentations. Ces moyens de mesures plus spécifiques sont principalement ceux dédiés aux études de faisabilité pour le contrôle ou le remote monitoring des procédés. Mais ils peuvent également être utilisés pour la validation de la simulation numérique (évolution de la position de la zone fondue en cours de soudage) ou la compréhension des mécanismes physiques (mesure la variation de la pression acoustique entre l’électrode et le bain de fusion). Cette réflexion conduit à ne pas verrouiller le développement de la centrale d’acquisition aux instrumentations de types procédé, thermique, mécanique et optique rapide.

Les instrumentations complémentaires que nous mettons en œuvre selon les besoins sont un microphone Brüel et Kjær à condensateur prépolarisé à champ libre pour une gamme de fréquences allant de 6 Hz à 20 kHz , ou encore d’un accéléromètre ... Ce sont des capteurs passifs, pour des mesures locales qui peuvent fournir des informations globales sur le fonctionnement du procédé (cf. chapitre 4).

2.5 Synchronisation des mesures

L'ensemble des chaînes de mesures développées à ce jour ont été présentées dans la section précédente. La centrale d'acquisition a été conçue de façon à être polyvalente et évolutive comme on a pu le voir notamment par l'utilisation d'instrumentations de types microphone ou accéléromètre.

Pour répondre à l'objectif d'effectuer des mesures multiphysiques, il est nécessaire de synchroniser l'ensemble des chaînes de mesures. Pour y parvenir, plusieurs cartes d'acquisition autorisant l'utilisation de voies analogiques, numériques voire même de compteurs, doivent être utilisées simultanément. Les fournisseurs de matériels d'acquisition proposent des solutions clefs en main (baie d'acquisition + logiciel) pour des mesures de types analogiques [106]. Ces solutions ne sont pas adaptées à cette étude car elles ne permettent pas l'utilisation de tous les moyens de mesures, et ne répondent pas au critère de proposer une plateforme expérimentale évolutive. L'autre solution est d'utiliser des cartes d'acquisition (entrées/sorties analogiques et numériques) et de développer les programmes en C/C++. Nous nous sommes finalement orientés vers une solution intermédiaire. L'utilisation du matériel NI[®], qui est particulièrement modulable et accessible, autorise l'utilisation d'instrumentations multi-tâches en proposant une programmation objet (Labview[®]⁸) pour le développement du logiciel d'acquisition.

Les différentes chaînes de mesures sont câblées aux cartes d'acquisition de données National Instrument (NI[®]) couplées avec NI[®] DAQmx. Trois cartes NI[®] sont nécessaires :

1. une pour le contrôle de la table XY, le générateur de soudage et le retour des coordonnées de la trajectoire réelle ;
2. une seconde pour l'acquisition des voies thermocouples et jauges de déformations (ne nécessitant pas de grande fréquence d'acquisition $20Hz$) ;
3. et la troisième pour l'acquisition des paramètres de soudage ($\cong 10kHz$), la commande de la plateforme dans son ensemble, et pour finir elle est la carte de référence (carte maître) pour la synchronisation de toutes les mesures.

Les tâches associées à chaque carte NI[®] sont conditionnées suivant plusieurs contraintes. En effet, après configuration d'une voie analogique d'une carte $Card_1$ pour une fréquence d'acquisition F_1 , la seule possibilité est d'utiliser cette même fréquence F_1 pour toutes les autres voies. Cette fréquence F_1 est aussi étroitement liée à la bande passante de la carte d'acquisition $Card_1 = 250kHz$. Par exemple, si $F_1 = 50kHz$, on pourra alors utiliser seulement quatre voies supplémentaires (soit 5 voies en tout) toutes à une fréquence $F_1 = 50kHz$ ($250/50 = 5$). De plus, lorsque toute la bande passante est utilisée, NI[®] ne garantit pas une synchronisation fine des voies actives de $Card_1$ (décalage négligeable dans notre cas). Ces caractéristiques du matériel NI[®] justifient le choix d'associer plusieurs cartes d'acquisition en fonction de la dynamique des mesurands. Ainsi il est possible d'atteindre les fréquences nécessaires à chacune des instrumentations même dans le cas de mesures procédé, thermique, mécanique et optique simultanées.

2.5.1 La solution matérielle

La solution matérielle retenue est le résultat d'un ensemble de contraintes qui permettent de synchroniser l'ensemble des instrumentations. Les voies procédé, mécanique et thermique sont synchronisées via une synchronisation multicartes (figure 2.25), qui demande toutefois, une programmation sous Labview[®] pour définir la pré-configuration de l'ensemble de nos voies d'acquisition actives avant le début de l'acquisition de données (figure 2.26) [122]. Les données sont

8. (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)

récupérées à partir des buffers une fois l'expérience terminée, ce qui permet d'être indépendant du temps de réponse de l'operating system (Windows[®] XP pour notre plateforme).

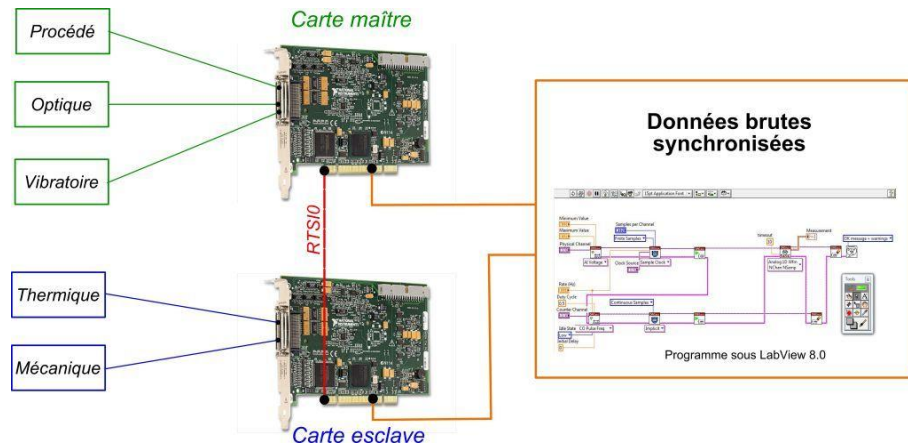


FIGURE 2.25 – Synchronisation matériel multi-cartes NI[®]

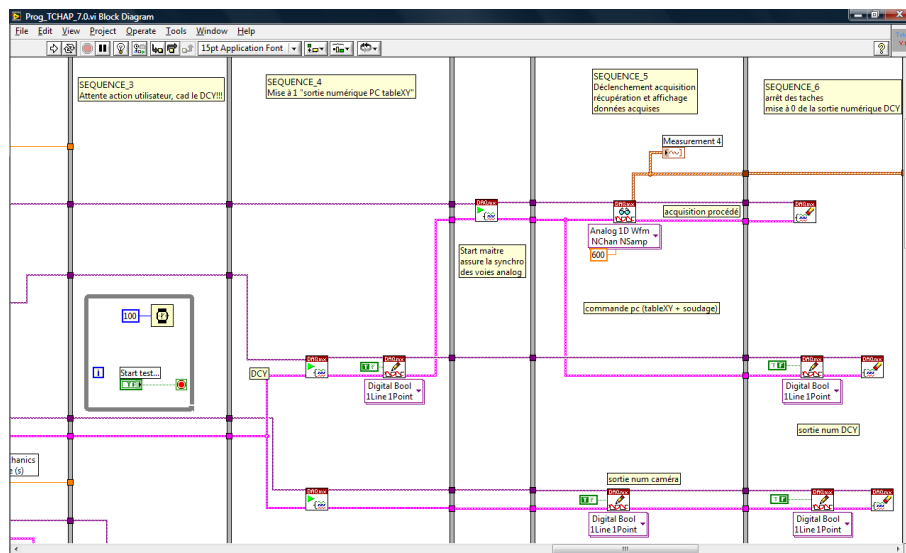


FIGURE 2.26 – Diagramme du programme de synchronisation matérielle sous Labview[®] 8.0

La synchronisation de la caméra rapide avec les autres instrumentations est assez délicate. La caméra, un matériel PHANTOM[®] V5.0, fonctionne en effet avec un ordinateur dédié.

La caméra, une fois configurée, enregistre en boucle les images de la zone d'intérêt dans sa mémoire tampon (2Go) jusqu'au top signal qui donne la fin de l'acquisition d'images (le **trigger**). L'instant associé au **trigger** correspond donc à la dernière image acquise. La synchronisation est assurée grâce au signal **STROBES** généré par la caméra en cours d'acquisition (figure 2.27). Ce signal permet d'extraire la fréquence d'acquisition (f_{ps}), le temps d'exposition, mais également la position du trigger dans le temps d'acquisition. Le choix d'un compteur sur la carte d'acquisition maître s'impose. Le compteur de la carte supporte une tension comprise entre 0 et 5V. Le signal **STROBES** est en 0 - 7.5V sur la caméra. La pleine échelle du signal est réduite à 0 - 5V en utilisant une diode Zener comme conditionneur. Le signal est à 0V lors de la prise de vue. Le compteur permet ainsi de compter grâce au signal **STROBES**, le nombre d'images acquises et la position de la dernière image dans le temps de l'expérience. Il est donc possible de repérer les

images acquises en fonction des autres mesures effectuées (figure 2.27).

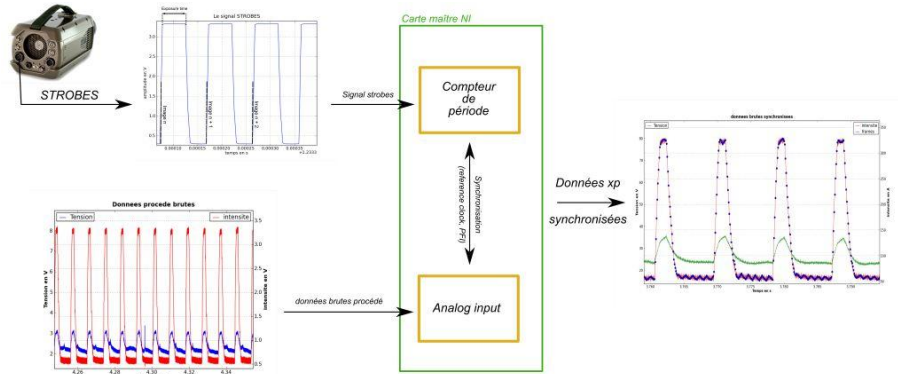


FIGURE 2.27 – Utilisation du signal **strob** pour la synchronisation de la caméra

La dernière étape consiste à synchroniser le compteur de la voie **STROBES** avec les autres instrumentations, donc les voies analogiques. Dans le cas présent, il s'agit d'une synchronisation multi-tâches (compteur/entrées analogiques). Comme pour la synchronisation des voies analogiques, le compteur câblé sur la signal **STROBES** est pré-programmé dans le logiciel d'acquisition.

Afin d'être plus précis, les cartes d'acquisition NI[®] ont leurs horloges internes (**RTSI/PFI**) reliées par un câble d'où le nom de synchronisation matérielle [122]. Pour la commande de la table XY ainsi que le générateur de soudage nous utilisons des sorties numériques⁹ synchronisées avec l'acquisition des données. Un diagramme résumant cette solution de contrôle de l'outil et de synchronisation des instrumentations est présenté à la figure 2.28.

L'ensemble des données expérimentales ainsi que la synchronisation des images sont récupérées et enregistrées une fois l'expérience terminée.

2.5.2 Logiciel d'acquisition

Le logiciel d'acquisition, développé avec le code **Labview**[®], permet d'assurer le contrôle de la plateforme de soudage qui compte la table XY, le procédé de soudage et la centrale d'acquisition des données synchronisées.

Le cahier des charges qui a servi de base au développement du logiciel est le suivant :

- une utilisation accessible à tous les expérimentateurs ;
- une procédure unique quelque soit l'expérience ;
- un renseignement riche de l'expérience, en **GTAW** ou en **GMAW** (paramètres opératoires et d'acquisitions, commentaires, etc.) ;
- un fonctionnement synchronisé entre les différentes instrumentations, la table XY et le générateur de soudage indépendamment de l'OS¹⁰ ;
- une sauvegarde automatique des données brutes ;
- la possibilité d'ajouter de nouvelles instrumentations.

Pour une meilleure appréciation du logiciel proposé à la suite, nous rappelons qu'un programme **Labview**[®] est constitué de deux parties appelé face avant et face arrière [123] : La face avant du logiciel correspond à l'I.H.M., c'est à dire à la façade que l'utilisateur du logiciel

9. les sorties numériques commandent des relais (contact sec)

10. Operating system, Ex. **Windows**[®]

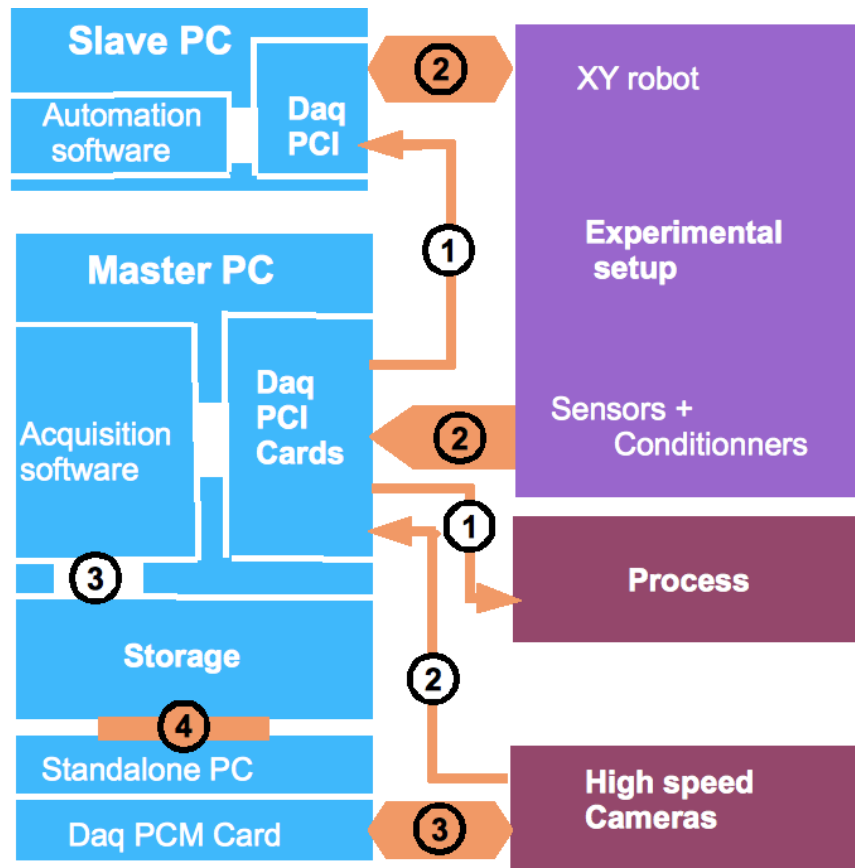


FIGURE 2.28 – Diagramme résumant le fonctionnement de la plateforme expérimentale

voit. Cette partie du logiciel contient l'ensemble des éléments dont l'utilisateur a besoin pour faire fonctionner le code contenu dans le logiciel. Il s'agit des paramètres ou variables d'entrées (boutons rotatifs, curseurs, etc.), des paramètres ou variables de sortie (graphes, afficheurs numériques, afficheurs textes, etc.). La disposition des éléments est entièrement libre et de ce fait, il est possible de réaliser une I.H.M. complètement personnalisable afin de faciliter le travail des utilisateurs. La seconde partie d'un programme développé dans l'environnement Labview est la face arrière ou diagramme qui correspond au code proprement dit. La particularité du logiciel Labview[®] tient à l'utilisation d'un langage graphique appelé langage G.

Dans la section 2.5.1 et plus particulièrement sur la figure 2.26, une partie du diagramme du logiciel est présentée. Il s'agit d'une solution de programmation permettant la synchronisation de toutes les instrumentations, de la table XY et du générateur de soudage. Pour répondre aux autres items du cahier des charges, nous avons choisi de structurer une interface utilisateur en quatre onglets :

1. renseignement de l'expérience ;
2. choix et configuration des instrumentations à activer avec leurs positions ;
3. exécution de l'expérience avec l'acquisition et le stockage des données.
4. notes, autorisant l'ajout de commentaires sur l'expérience.

Le premier onglet présente des champs à compléter ou à sélectionner (figure 2.29). Il concerne toutes les informations de types opératoires sur l'expérience en cours, comme les paramètres procédé, la géométrie de l'éprouvette, etc. Le second onglet propose les différents types d'instrumentations disponibles par défaut (procédé, thermique, mécanique et optique). Cet onglet

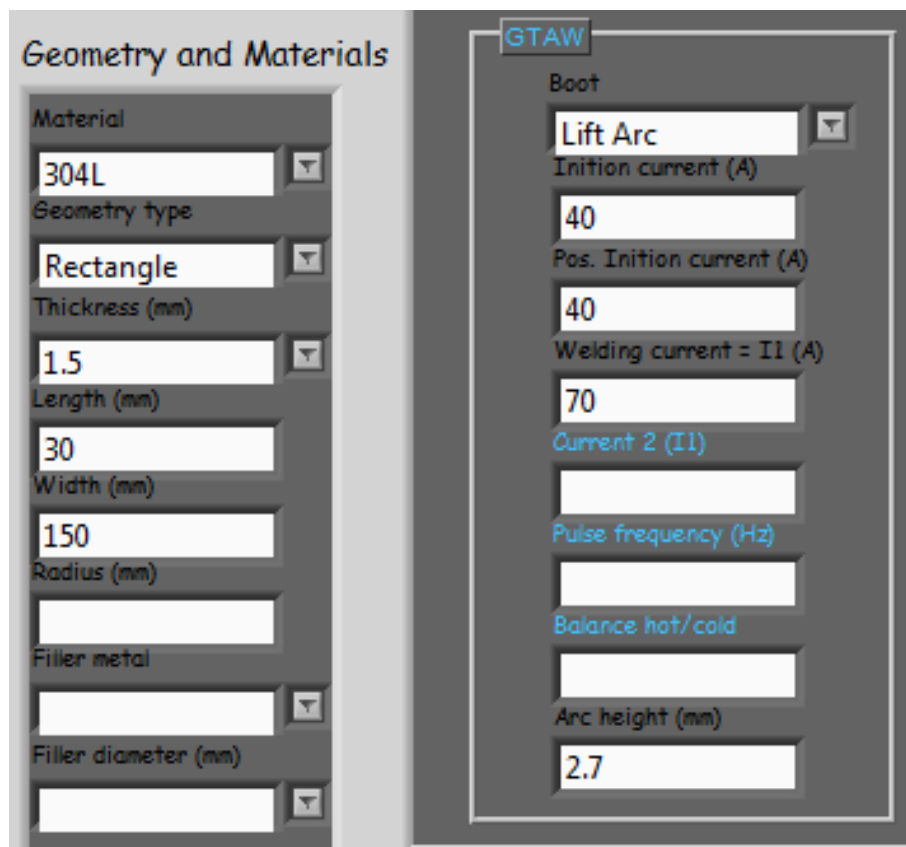


FIGURE 2.29 – Capture d'écran d'un cluster d'information du logiciel d'acquisition

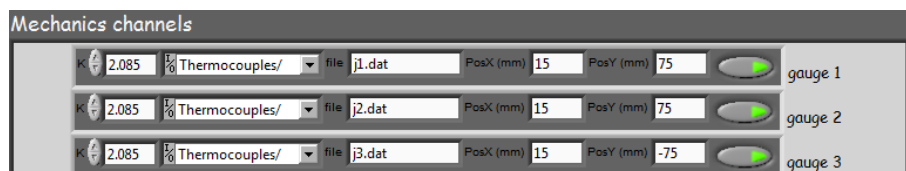


FIGURE 2.30 – Capture d'écran d'un champ de configuration de voie du logiciel d'acquisition

permet l'activation des voies utilisées, le choix des fréquences d'échantillonnage, les temps d'acquisition souhaités et la position des capteurs (figure 2.30). L'ensemble de ces informations sont capitalisées dans un fichier `info.don`. Ce fichier est une sorte de carte d'identité associée à un essai pouvant servir ultérieurement à retrouver facilement des expériences par mots clés dans une base de données expérimentale, ou encore faciliter la validation de la simulation numérique grâce à la connaissance de la géométrie de l'éprouvette et de la position des capteurs. Le troisième onglet présente une synthèse des instrumentations activées et opérationnelles, puis un bouton DCY¹¹. Une fois l'expérience terminée, les différents signaux mesurés peuvent être visualisés afin de donner des premières indications sur le déroulement de l'expérience. Enfin, le dernier onglet permet d'ajouter des commentaires libres sur l'expérience commentaires qui sont automatiquement ajoutés au fichier `info.don`. L'utilisation de ce logiciel ne demande aucune connaissance particulière du code Labview[®].

11. Départ cycle

2.6 Conclusion

La première étape du développement de l'approche expérimentale multiphysiques a été présentée. Nous avons d'abord constaté que l'environnement d'un arc électrique est source de perturbations de types électromagnétique, électrostatique, magnétostatique et thermique. Les solutions techniques pour optimiser la qualité des instrumentations de types procédé, thermique, mécanique et optique ont été définies en respectant une procédure d'identification et de quantification rigoureuse de leurs effets. La connaissance des frontières entre les différents étages (échantillonneur, conditionneur et capteur) d'une chaîne de mesure est très importante. Elle permet de déterminer si les fréquences échantillonnages atteintes sont suffisantes selon le mesurande et si l'utilisation simultanée de ces instrumentations est possible. Ensuite, la problématique synchronisation nous a orienté vers une solution matérielle. Pour finir le logiciel développé sous **Labview** autorise le contrôle de la plateforme, et le renseignement précis de chaque expérience. Cette plateforme répond ainsi au besoin d'obtenir des mesures procédé, thermique, mécanique et optique couplées. Cet outil expérimental (figure 2.31) est conçu pour évoluer en continu en fonction des différents besoins de mesure ou des différentes campagnes d'essais.

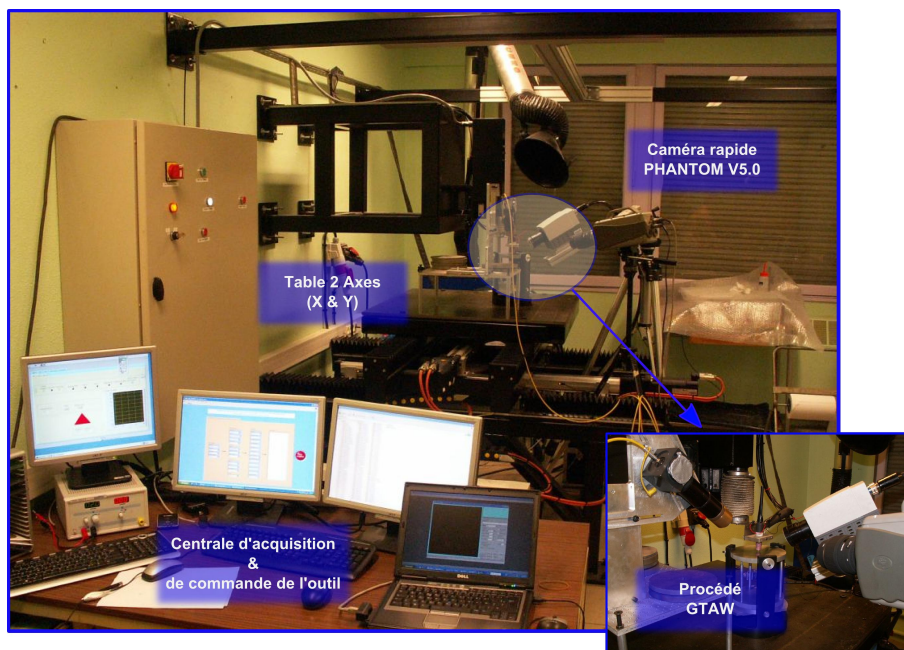


FIGURE 2.31 – Photo de la plateforme expérimentale

Le flux de données pouvant être généré par cet outil d'acquisition de données multiphysiques peut être très important (de quelques *Mo* à plus de *2 Go* par expérience). Le chapitre 3 a pour objet de proposer une solution permettant à la fois la hiérarchisation et la gestion de ces nombreuses données expérimentales. Il constitue la deuxième étape pour répondre au triple objectif de compréhension, validation et contrôle pour les procédés à arc.

Chapitre 3

Une approche expérimentale multiphysique

3.1 Introduction

Le chapitre 2 a présenté l'outil de mesures multiphysiques. Cette plateforme, polyvalente dans sa conception, donne accès à différents types d'études expérimentales pour les procédés à arc sous flux gazeux (soudage statique ou dynamique, modulation des paramètres procédés, couplages et synchronisation des différentes mesures). Cet outil d'acquisition de données multiphysiques génère un flux important de données pouvant aller de quelques dizaines de *ko* pour une acquisition simple de signaux thermiques et mécaniques à plus de 2 *Go* lors d'une acquisition avec une caméra rapide et les voies de tension et d'intensité lors de l'analyse des dynamiques de transfert dans l'arc et le bain.

Ce chapitre 3 a pour but de montrer les outils développés pour gérer et exploiter ce flux important de données expérimentales multiphysiques synchronisées. Les outils devront à la fois être capables de gérer les différentes échelles de temps, les différents types de mesures (signaux ou caméras) mais aussi les comparaisons entre les essais et les outils modernes de simulations multiphysiques. Le but est d'apporter des améliorations de procédé, (forme de courant, par exemple) pour dépasser certains verrous technologiques.

L'une des solutions pour gérer un grand nombre d'essais ou de mesures est la structuration et l'archivage des expériences sous forme de base de données. L'intérêt de l'archivage des données réside dans la possibilité de capitaliser des données expérimentales comme la géométrie du bain de fusion en fonction des paramètres procédé. Ces informations peuvent être utiles par exemple pour l'étude de la fissuration à chaud, l'alimentation de modèle numérique arc-bain, le contrôle en cours de soudage, etc. Aussi, un outil d'accès aux expériences, la Bibliothèque d'Analyse de Mesures Expérimentales (**BAME**, [29]), est proposée. Il s'agit d'un ensemble de fonctions permettant l'analyse comparée de différents résultats expérimentaux et/ou de simulations numériques. Pour finir, un module complémentaire **erCv** développé par Edward Romero (post doctorant 2008-2010, recruté sur l'ANR TEMMSA, Jeunes Chercheurs 2007) [124], pour l'analyse d'images enregistrées en cours de soudage est présenté. Cette bibliothèque permet de détecter le contour d'un bain de fusion **GTAW**, le profil de la surface libre d'un bain de fusion **GMAW** ou les gouttelettes en cours de transfert en **GMAW** en temps réel et de manière automatique.

Les bibliothèques **BAME** et **erCv** câblées avec la base de données expérimentales multiphysiques et les logiciels de simulation numérique composent l'approche. Cette approche constitue un outil pour :

1. extraire des temps caractéristiques ou des dynamiques d'évolution ;
2. développer des outils de diagnostics ;

3. enrichir et corréler la simulation ;
4. et capitaliser les données.

3.2 Optimisation des procédés à l'arc

L'évolution des technologies en soudage à l'arc nécessite la mise en place de base de données conséquentes. Le développement des synergies illustre bien ce besoin. Les constructeurs de matériels de soudage proposent aujourd'hui des postes synergiques pour tous types d'utilisateurs (du carrossier, au soudeur des centrales vapeur). La recherche de ces points de fonctionnement couvrant de nombreuses applications, nécessite l'exécution d'un nombre conséquent d'essais souvent répétitifs (suivant les matériaux soudés, le régime de courant, le gaz de protection, l'épaisseur de l'assemblage, la position de soudage, etc....) [125]. La capitalisation des données couplée à un outil permettant de croiser les informations des différents essais réalisés est alors primordiale.

Afin d'améliorer les problématiques associées aux procédés (productivité, environnement,...), des voies d'optimisation doivent être définies. La première est celle de l'expérimentation, avec comme objectif l'identification et la compréhension des phénomènes et mécanismes physiques expliquant les limites des procédés de soudage. Ces études deviennent rapidement complexes et demandent une modélisation simple des phénomènes identifiés afin d'améliorer la compréhension par une autre voie d'optimisation : la simulation. Le schéma résumant cette réflexion est présenté à la figure 3.1.

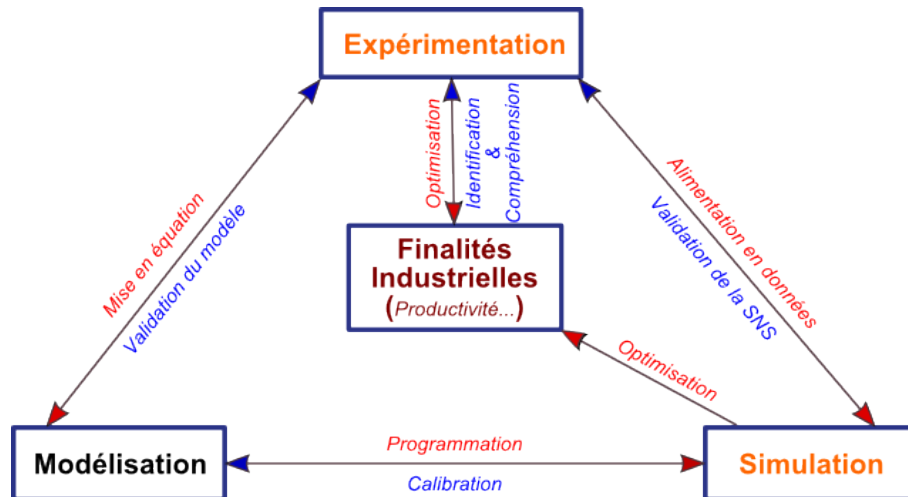


FIGURE 3.1 – Voies d'optimisation possibles pour diverses problématiques

Finalités industrielles ou problématiques : Les besoins en connaissances et en maîtrise de la fabrication poussent les industriels à se poser des questions sur le choix des procédés, les problèmes causés par leur utilisation et des solutions d'optimisation. Les problématiques principales sont la productivité et la qualité, tout en cherchant à éviter les phases de préparation à l'assemblage et de parachèvement.

De plus, l'évolution des matériaux soulève des problèmes de soudabilité. Cette problématique, initialement matériaux, a des conséquences sur le choix des consommables (métaux d'apport et gaz de protection interagissent), et devient une problématique procédé [126]. Dans le cas de nouveaux matériaux (ou alliages), le développement d'une solution pour l'assemblage prend aussi en compte le critère environnemental, comme la toxicité des fumées de soudage résultant de la vaporisation à l'interface arc/bain de fusion qui dépend évidemment de la nature chimique de l'opération de soudage (nature gaz de protection, métaux de base et d'apport) [15].

Enfin, les réponses à ces diverses problématiques ont pour principal objectif d'aboutir à une soudure qui assure la continuité permanente de l'assemblage.

Expérimentation : Dans le cadre des études de l’opération d’assemblage et de la soudure, les essais restent la voie privilégiée pour une première approche de la problématique étudiée. A ce jour les essais sont focalisés sur les grandeurs macroscopiques (tension d’arc [127; 128]) ; quantitatifs sur les dynamiques de bains de fusion. Les essais sont alors réalisés dans le but de mettre en évidence un paramètre dans une certaine configuration. L’expérimentation aide à l’identification et à la compréhension de la problématique traitée par l’observation, la mesure instrumentée ou encore des plans d’expériences. Aujourd’hui, des outils d’acquisition comme les caméras rapides et les cartes d’acquisitions permettent de capturer les phénomènes rapides. Néanmoins, la réalisation d’essais est coûteuse puisqu’elle nécessite un temps de préparation des capteurs d’acquisition, de répétabilité et de coût pour les consommables.

Modélisation/Simulation : De nombreux modèles existent pour les applications soudées (chapitre 1). Les modèles dérivent des lois de conservation de la physique (conservation de l’énergie, de la quantité de mouvement,...). La simulation peut être utilisée pour prédire des phénomènes sur structures et ainsi limiter le nombre des essais. Suivant l’information recherchée (distorsions, instabilité de bain), différents modèles numériques seront mis en œuvre (thermo-mécanique ou thermo hydraulique) et des réductions de modèles (non prise en compte de l’arc) nécessitent des calages avec des essais. Certains de ces calages sont intégrés dans les logiciels du commerce.

Les simulations sont en général coûteuses (temps de calcul pouvant atteindre plusieurs jours ou semaines [67]). L’utilisation de modèles simplifiés ou optimisés permet de réduire ce temps de calcul. Les simulations apportent des informations qui améliorent la compréhension des physiques induites. La simulation donne accès à des informations de champs, comme les températures ou les cinétiques d’écoulement au sein du bain de fusion [43]. Ces données sont difficiles, voire impossibles, à mesurer expérimentalement avec des dispositifs légers.

3.2.1 Un constat ”mono-problématique”

La plupart des articles consacrés à l’étude du soudage à l’arc par une approche expérimentale sont consacrés à l’étude d’une problématique bien spécifique telle que la détermination de la géométrie du bain de fusion par acquisition vidéo [4], l’étude des transferts de matière électrode-pièce [65] ou encore la mesure du rendement d’un procédé [93] (cf. chapitre 1). Ce constat est également vrai pour la simulation numérique. Les études sont souvent orientées procédé [32], mécanique [99] ou matériaux [86]. Néanmoins, ce type d’approche est tout à fait adaptée dans le cadre de certaines études. Par exemple l’étude des distorsions en soudage ne nécessite pas forcément de modéliser la dynamique du procédé en couplant physiques de l’arc, du bain de fusion pour en déduire le champ thermique dans l’éprouvette au cours du refroidissement. Les temps caractéristiques du procédé vis-à-vis de ceux des distorsions sont très différents. A l’inverse, si on s’intéresse à la fissuration à chaud, on devra coupler le procédé, à un modèle thermo-hydro-métallo-mécanique pour la compréhension du mécanisme [129]. En effet, le procédé contrôle l’arc électrique qui, à un mode opératoire donné ($V_{soudage}$, I , U , nature et débit du gaz de protection, etc.), générera une géométrie de bain de fusion et les mouvements de convection spécifiques. La géométrie du bain (zone considérée libre de contraintes) aura une influence sur les niveaux de contraintes atteints dans la zone pâteuse [130]. C’est un problème complexe qui nécessite une approche multiphysique.

Au vu de l’ensemble des essais dans la littérature, une méthodologie s’est mise en place. Effectivement, on peut se demander alors, si les acquisitions vidéos de Y.M. Zhang et al [4] pour le contrôle avaient été synchronisées à des mesures procédés, si le temps caractéristique d’établissement du bain de fusion n’aurait pas pu être déterminé. L’accès aux formes des signaux électriques lors de l’étude du détachement de gouttelettes en MIG Pulsé, permettrait de se donner des indicateurs assurant la qualité du dépôt. La possibilité de connaître pour chaque image du bain de fusion GTAW en cours de soudage les paramètres procédés synchronisés, peut être utile

pour l'étude du comportement dynamique du bain de fusion selon le régime de courant et l'intensité utilisés. L'étude de Renwick & Richardson [55] propose le traitement du signal de tension d'arc pour monitorer le procédé GTAW en cours de soudage. Une variation de la tension d'arc indique une variation de la hauteur d'arc et donc de l'énergie de soudage. Cette variation peut-être due aux mouvements de la surface libre, mais aussi à la présence d'oxyde, ou un défaut de gaz de protection. Pour valider le fait que l'oscillation de la surface libre se reflète sur le signal de la tension, il est nécessaire de synchroniser cette mesure avec une caméra afin de visualiser à travers l'arc le bain de fusion.

3.2.2 L'approche proposée

L'expérimentation et la simulation sont complémentaires dans la compréhension des phénomènes induits lors des procédés à l'arc. A partir de l'outil expérimental développé au chapitre 2, des outils informatiques vont être mis en place dans ce chapitre afin de pouvoir gérer l'optimisation des procédés par la voie expérimentale mais aussi d'intégrer certaines comparaisons aux outils de simulations numériques existants.

Les outils qui vont être développés devront :

- capitaliser les essais réalisés
- gérer les flux massifs d'informations brutes (images et signaux) générés par l'outil de mesure
- analyser les données au niveau expérimental et valider de nouvelles solutions de contrôle.
- assurer le dialogue et la comparaison avec les outils de simulation

Le premier objectif sera réalisé en définissant une base de donnée qui sera réutilisable dans le temps avec retour sur les expériences.

Les trois objectifs suivants seront réalisés par l'intermédiaire d'une bibliothèque définie au cours de ce travail (figure 3.2). Le choix d'un outil informatique s'est imposé afin de rendre automatique les analyses sur une période ou au cours d'une fenêtre temporelle.

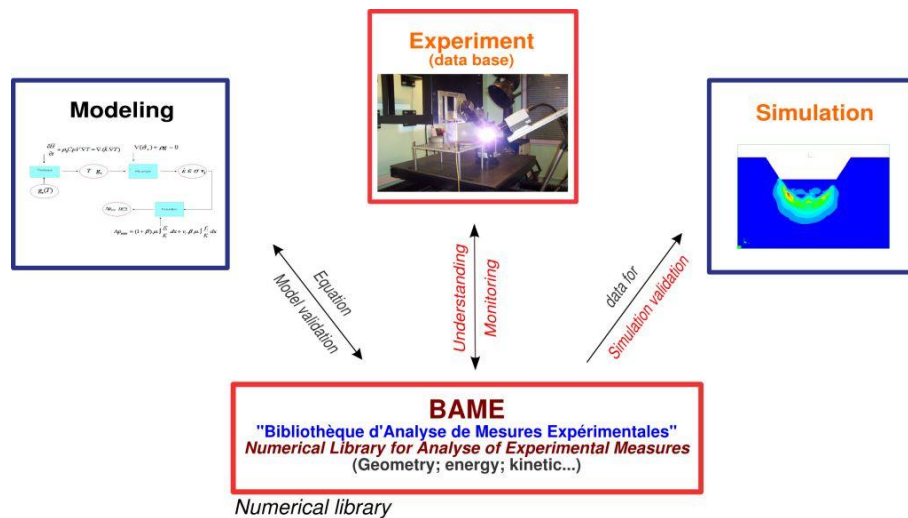


FIGURE 3.2 – Schéma une approche pour l'optimisation

Par exemple, pour la caractérisation d'un transfert métallique en GMAW pulsé, l'expérimentateur utilisera une caméra rapide associée à un dispositif optique pour l'observation de la gouttelette entre l'électrode fusible et le bain de fusion. Suivant la fréquence d'échantillonnage et la fréquence de pulsation du courant, une trentaine d'images par pulsation doivent être analysées par gouttelette transférée. L'extraction des informations de types géométrie, position (pour le calcul de la vitesse) de la gouttelette devront être fait manuellement via un programme comme ImageJ[®] ; rendant toutes informations statistiques (moyenne, écart-type, moment, ...) sur le

procédé délicate à réaliser.

3.3 Définition de la base de données expérimentales

La plateforme expérimentale autorise l'étude de problématiques diverses comme la fissuration à chaud, le comportement dynamique du bain de fusion en GMAW pulsé ou encore l'instabilité élastique des assemblages soudés minces. La plateforme de soudage avec ses différents capteurs et le logiciel d'acquisition permettent de générer un grand nombre de données sur chacune de ces études. Dans cette partie, la base de donnée d'essais va être mise en place permettant à la fois de capitaliser l'ensemble des essais réalisés mais aussi d'envisager le traitement massif d'informations pour l'analyse des procédés.

3.3.1 Traçabilité des expériences

Afin de pouvoir revenir sur les essais dans le temps, deux techniques ont été mises en place.

La première consiste à normaliser la désignation des expériences. Trois lettres significatives sont choisies par campagne d'essais (exemples : FIS, pour la fissuration à chaud, DTM, pour les distorsions mécaniques, etc.), ensuite la date du jour de l'expérience y est associée. Par exemple, la désignation d'une expérience pourrait être FIS_01082010_2 pour l'étude de la fissuration à chaud, datant du premier août 2010 et le troisième essai du jour.

La deuxième technique est la création d'un fichier `info.don` à l'aide du logiciel d'acquisition développé au chapitre 2. Ce fichier contient toutes les informations propres à une expérience comme le nom de la campagne, les opérateurs, les instrumentations utilisées, les paramètres procédé et bien d'autres. Toutes ces informations ont été renseignées dans les champs prévus¹ à cet effet sur l'interface du logiciel. De cette manière chaque expérience possède une fiche d'identité respectant le même format. Le fichier pourra être parcouru pour rechercher des essais effectué en Helium, etc.

3.3.2 Structuration des données

Pour rendre automatique et rapide l'accès aux données, différentes techniques sont envisageables. Pour gérer un flux important de données, il existe des solutions comme : NetCDF, Concept Unidata [131], expérience MégaJoule (CEA/Bordeaux) [132]. Une des plus connue est la librairie HDF5 qui autorise un accès rapide aux données [133]. Mais au vue de la spécificité de notre cahier des charges, nous avons choisi de structurer nos données en nous inspirant des solutions existantes.

Pour rendre possible l'automatisation de notre approche, chaque essai a été structuré de la même manière. La figure 3.3 représente le découpage d'un essai qui utilise en grande partie les différents moyens de mesures développés dans le chapitre 2. A chaque grandeur physique est associé un répertoire, par exemple les paramètres de soudage seront stockés dans `Process`, les signaux des thermocouples dans `Thermal` et ainsi de suite. On retrouve le fichier information soit `info.don` ainsi qu'un répertoire `Geometry`. Ce dernier donne la possibilité d'y renseigner la géométrie de l'éprouvette, par exemple via un modèle géométrique CAO pouvant servir à la simulation par EF dans un logiciel adapté en vue d'une validation d'un modèle numérique. La base de données créée intègre également des données qui peuvent être traitées à posteriori, comme par exemple des macrographies stockées dans un répertoire `Metallurgy` (un fichier `metallurgy.don` permet de connaître la position des macros ou d'autres analyses (micro sonde)). Les images sont stockées dans un répertoire `Cameras` sous divisé par d'autres répertoires selon les caméras actives.

Le format des données de types analogiques (jauge de déformation, thermocouple, procédé) est identique, une première colonne `temps` et une seconde pour le `signal` mesuré.

1. clusters en langage technique

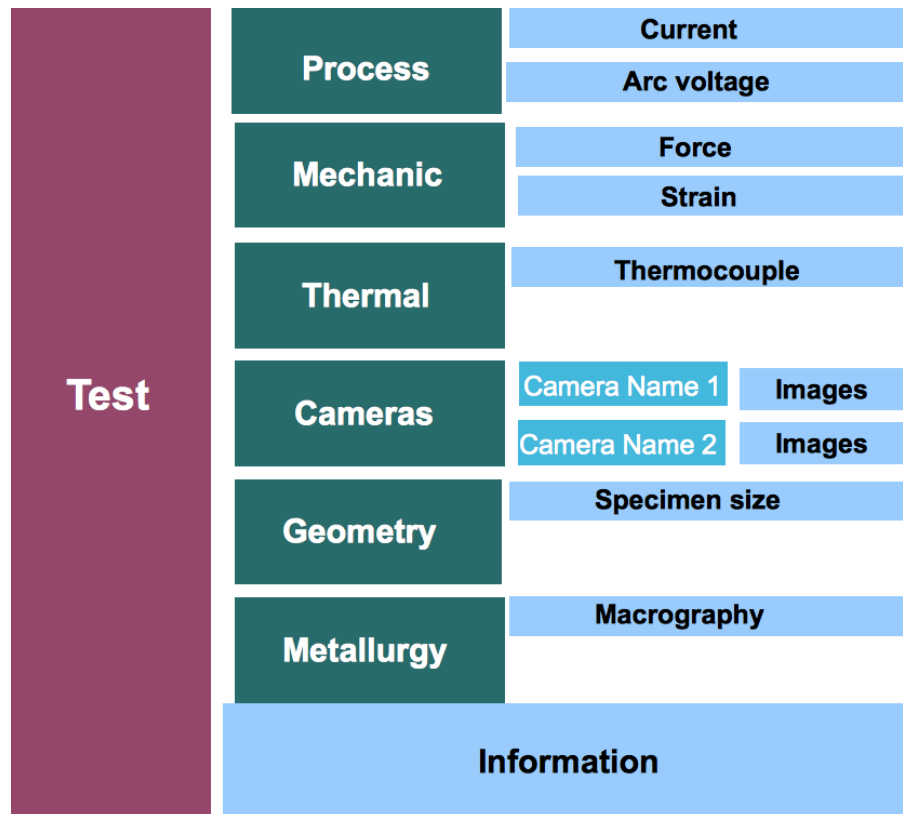


FIGURE 3.3 – Structuration des données

Pour résumer, une expérience est déclarée par une désignation normalisée dès l'exécution du logiciel d'acquisition. En ce même instant, tous les répertoires et le fichier `info.don` sont initialisés dans la base de données expérimentales et sont en attente pour la sauvegarde des données acquises, le renseignement de la géométrie et de l'expérience.

3.4 Bibliothèque d'Analyse de Mesures Expérimentales : BAME

Dans cette partie, l'outil permettant d'accéder aux résultats d'essais et de les analyser va être décrit. Cette bibliothèque fournit les interfaces pour retrouver les informations dans la base de données. La conception de l'outil informatique va être détaillée et l'utilisation sur quelques essais sera illustrée. Le choix du développement, s'est aussi imposé puisqu'au début de cette thèse, aucun outil de ce type n'était disponible.

L'outil est au centre de l'approche puisqu'il permettra d'analyser nos essais mais aussi d'assurer les analyses couplées avec la simulation numérique.

Une analyse d'une expérience passe par l'extraction de plusieurs quantités. Premièrement, la mesure, les dérivés ou l'intégrale pourraient être nécessaires en fonction de l'analyse : temps caractéristique, énergie, etc. L'analyse de données est souvent pénible et laborieuse pour un processus complexe comme le soudage en raison de la relation croisée qui existe entre les différents phénomènes et mécanismes physiques. Les temps caractéristiques des différents phénomènes peuvent être de plusieurs ordres de grandeur. Certaines données nécessitent pour l'analyse des Transformées de Fourier alors que l'analyse directe est possible sur d'autres signaux. Le traitement est souvent lourd. L'analyse des signaux doit être automatisée, et prendre en compte l'interfaçage des outils numériques (comme l'analyse par éléments finis) avec les données expérimentales associées.

Pour résumer, le cahier des charges pour la conception et le développement de la bibliothèque BAME est le suivant :

- portabilité (utilisable sur tous les operating system) ;
- interactivité ;
- extensible (facilement modifiable) ;
- gestion de tous types de signaux (analogiques, images) ;
- gestion des fichiers volumineux (de la base de données expérimentales) ;
- cablée aux outils numériques scientifiques pour l’analyse.

Note technique : La BAME est programmée en langage `python` [134]. Ce langage a été choisi pour sa simplicité d’utilisation et parce que nous y retrouvons l’ensemble des librairies qui peuvent être disponible dans `Matlab`[®], comme `numpy` et `scipy`. Ce langage répond aux critères : 1) analyse des données ; 2) accès rapide aux données (par mots clefs dans le fichier `info.don`) ; 3) chargement rapide des données dans la mémoire active ; et 4) le plus important est que cette bibliothèque puisse être utilisée facilement par des ”non-programmeurs”.

3.4.1 Modules et structure

Une structure modulaire répondant à ces objectifs a été mis en place.

La bibliothèque est principalement divisée en quatre modules :

1. `analysis` : pour l’accès à la base de données (données acquises, `info.don` et `geometry`) ;
2. `GUI` : pour l’interface utilisateur/analyse ;
3. `modeling` : pour assurer le câblage avec des modèles simples et la simulation EF ;
4. `material` : une base de données matériaux.

Chacun d’entre eux peut être divisé en sous-modules (figure 3.4).

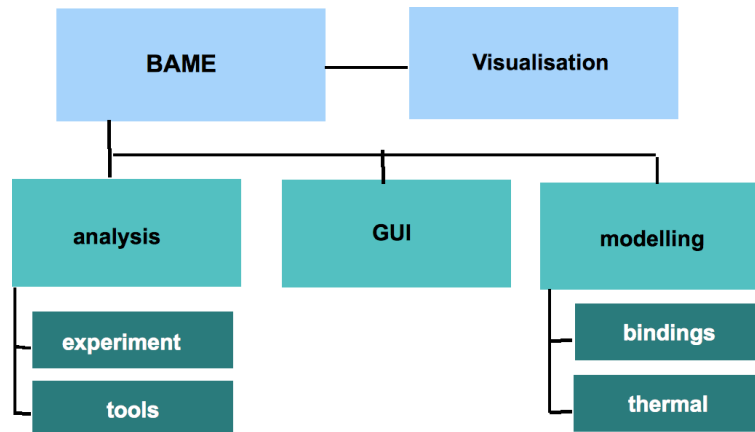


FIGURE 3.4 – Modules et structure de la BAME

Le module `analysis` gère l’accès aux données expérimentales. Le module est divisé principalement en deux sous-modules. Un premier qui gère l’accès à plusieurs essais expérimentaux et aux informations en rapport (`info.don`) et un second pour calculer les quantités impliquées dans l’opération de soudage à l’arc comme le calcul de puissance ou une **Fast Fourier Transform** pour une analyse spectrale.

Une classe de base `bameTest` a été élaborée et a ensuite été étendue pour le soudage. L’idée principale était de développer une expérience comme un objet qui partage essentiellement les mêmes concepts pour chaque campagne. Pour une analyse de soudage, chaque campagne aura

un générateur, l'acquisition de la tension d'arc et le signal courant, mais certaines campagnes sur les contraintes résiduelles impliqueront des jauges de déformations alors que celle faisant l'objet de l'étude du transfert de métal se concentrera uniquement sur le couplage entre les images et les paramètres du procédé. Avant une analyse, il n'est alors pas forcément souhaitable d'extraire toutes les données d'une expérience dans l'espace de travail. Par contre, elles doivent être conservées afin d'être capitalisées. Ainsi une méthode `configureExtraction` doit être déclarée par l'utilisateur afin de définir les données à traiter. Même si l'acquisition d'images a été réalisée, on peut choisir de ne travailler que sur les signaux électriques. Ces signaux ont un sens physique différent mais ils sont stockés de la même manière (section 3.3.2).

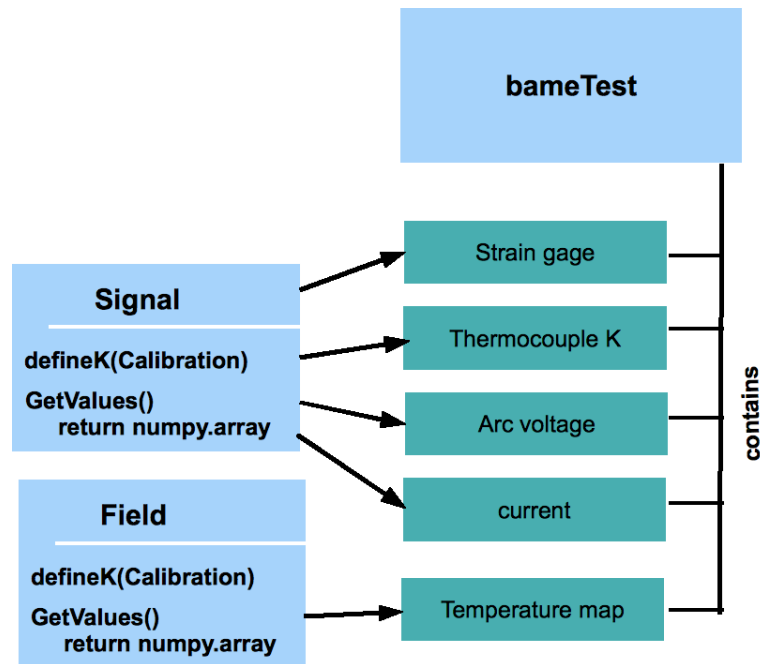


FIGURE 3.5 – Différents signaux interfacés avec la classe `bameTest`

La fonction `getValues` permet l'accès aux valeurs. Le `getValues` a plusieurs paramètres d'entrée. Parmi eux, il est possible d'entrer des temps triés dans un tableau afin d'interpoler les données expérimentales. Ceci est particulièrement intéressant lorsque plusieurs échelles de temps sont concernées (pour des fréquences d'échantillonnages différentes) et pour estimer les valeurs entre deux mesures (principalement des fonctions linéaires) pas forcément connues aux même instants. L'étalonnage est entré dans le signal via une fonction `defineK` qui permet la définition d'un simple coefficient proportionnel à une fonction complexe basée sur un fichier de calibration. Les valeurs de l'étalonnage sont conservées dans le fichier d'information (`info.don`) pour les facteurs proportionnels ou dans un fichier séparé pour les étalonnages non-linéaires.

Le module `modelling` est principalement lié avec des outils classiques de simulation (éléments finis ou volume finis) interfacés directement aux capteurs ou aux mesures de champs. Le couplage des données (numériques et expérimentales) est rendue facile par les renseignements précis situés dans le fichier `info.don` et `geometry.don`. La non-standardisation des fichiers de post traitement des modèles éléments finis est un problème et un choix de format doit être fait pour comparer les résultats de simulations et ceux expérimentaux. Les calculs éléments finis donnent les résultats aux noeuds ou aux points de gauss, des procédures d'interpolation doivent être ensuite mise en œuvre. C'est ce qui arrivera si un thermocouple (mesure ponctuelle) ne correspond à aucun noeud. Quelques post processeur (Paraview[®], Gmsh) permettent de trouver des valeurs de champs même si il n'y a pas d'entités de maillages. Dans `modeling`, le choix d'utiliser Paraview[®] (basé sur VTK, largement utilisé en imagerie médicale) pour comparer les données a été fait. Une illustration de comparaison simulation expérimentation sera mis en œuvre au chapitre suivant.

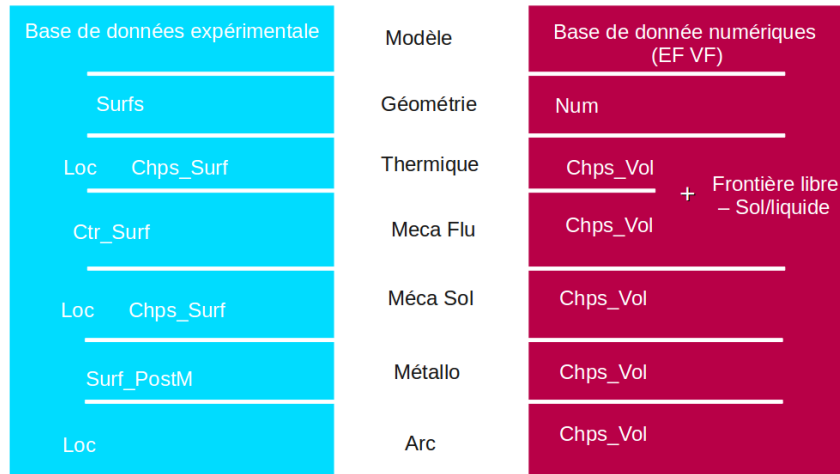


FIGURE 3.6 – Relations bases de données de simulation et expérimentales. **Chps** : champs, **Vol** Volumique, **Surf** : Surface, **Ctr** : contour, **Loc** local (ponctuel), **PostM** : Post Mortem

Sur la figure 3.6, les deux bases de données sont montrées. En général, les deux bases de données sont découplées et doivent être reliées par un lourd travail pour reconfigurer les résultats d’une base à l’autre. Les informations expérimentales sont souvent moins riches que celles que l’on peut obtenir en simulation. Les méthodes expérimentales permettent d’obtenir les informations uniquement sur les parties extérieures au corps. Elles permettent néanmoins d’avoir certaines informations au niveau des interfaces entre plusieurs domaines.

Diverses techniques permettent de faire interagir la simulation numérique du procédé de soudage et l’expérimentation. Par exemple, la simulation thermique nécessite une calibration des paramètres procédés essentiellement par le réglage des paramètres de la source Goldak 3D et par le calage de l’énergie. Dans le calage, un certain nombre de données expérimentales viennent être scrutées, telles que la taille et la forme du bain de fusion ainsi que la valeur de thermocouples. Ce calibrage peut se faire de manière plus ou moins automatisé. Entre autres, l’accès aux valeurs primaires comme la température en fonction de la position. La comparaison à des grandeurs géométriques telle que la taille du bain est beaucoup plus difficile à cause de l’impossibilité d’identifier une isosurface (isotherme de fusion) dans un maillage et surtout de l’extraire. Pour comparer la taille et la forme des bains de fusion expérimentaux et numériques dans l’espace physique, il faut à la fois avoir un accès à la position de la macro mais aussi aux données géométriques de la macrographie (polygone de points). La partie expérimentale est gérée dans la **BAME**. Chaque macrographie est référencée dans le dossier métallurgie. Un fichier info.don donne la position de l’image dans le specimen. Pour la comparaison, des interfaces ont été créés permettant d’intégrer ces données dans **Paraview**®. Les résultats des calculs numériques sont également transformés au format **Paraview**®.

3.4.2 Performances

Les performances de temps de recherche et de chargement des expériences constituant la base de données ont été testées. Tous les tests ont été effectués sur un PC avec un processeur Intel® Core Duo 2GHz.

3.4.2.1 Recherche des expériences

Tous les tests réalisés au laboratoire sont stockés dans un seul répertoire. Durant cette thèse, environ 300 essais ont été capitalisés dans cette base de données.

Le premier test consiste à évaluer le temps nécessaire pour l'analyse de ces 300 essais en scannant le fichier `info.don` (100 mots clés) défini par notre interface logiciel. Une fonction `bameFindTests` a été conçue pour trouver dans une arborescence de répertoire les expériences, suivant les critères choisis. Ici, les critères sont des mots-clés. Par exemple, si les essais effectués avec un gaz de protection 100% hélium et avec un générateur TIG Sincosald[®] 400 sont recherchés, un dictionnaire de mots clés avec `{'Gas' : 'Helium', 'Generator' : 'Sincosald 400'}` est transmis sous forme d'entrée de la fonction. Le premier passage dans la base de données est un peu plus long (environ 20 secondes pour les 300 expériences), par la suite toutes les nouvelles recherches s'excutent en environ 1 seconde.

3.4.2.2 Chargement de plusieurs fichiers

Le chargement de fichiers volumineux est encore un problème majeur avec des outils conventionnels. L'utilisation des fonctions `BameTest` autorise le chargement d'un fichier de 10Mo en 1 seconde. Ce temps croît linéairement avec le nombre de fichiers traités. Un autre exemple, le chargement d'images associées aux signaux procédé ne dépassera pas la minute (pour plusieurs centaines de Mo).

3.4.3 Exemples

Le but de cette section est de montrer, à travers quelques exemples, la simplicité d'utilisation de la BAME pour gérer le flux important de données acquises avec la plateforme de soudage. Deux types d'analyses sont présentés : 1) l'exploitation d'une expérience avec des images de transfert associées aux signaux acoustique et électrique, puis 2) une analyse comparée sur une campagne composée de plusieurs essais. La bibliothèque est largement utilisé dans le reste du document.

3.4.3.1 Analyse d'une expérience

Dans ce paragraphe, un seul essai expérimental est analysé, mais avec deux buts permettant de mettre en évidence la nécessité de la capitalisation des essais. et la validation d'un nouveau moyen de contrôle. La corrélation entre des mesures acoustiques provenant d'un microphone et procédé est analysée. Ce type d'étude a été réalisé en soudage MIG pulsé dans l'objectif d'identifier et de localiser des perturbations spécifiques à l'arc électrique, vitesse de soudage, etc. Ceci est fait en comparant les fréquences des signaux acoustiques et courant de soudage (cf. chapitre 4). D'autre part, le détachement de la goutte et son interaction avec le bain de fusion grâce à l'acquisition d'imagerie rapide entre l'électrode et l'éprouvette est aussi analysé. Sur un même essai, différents types d'analyses peuvent être effectués.

Pour cet essai, un courant pulsé à 100 Hz de 400 A a été utilisé avec une vitesse d'avance de 60 cm.min⁻¹. Le courant et la tension sont mesurés. Ces signaux sont acquis à une fréquence de 30 kHz par voie. En ce qui concerne l'acquisition de la variation de pression acoustique, un microphone Bruel Kjaer mesurant entre 2 Hz and 20 kHz a été utilisé. Le signal provenant de l'amplificateur du microphone est directement transmis sur la carte NI[®] conditionnée en $\pm 10V$. Cette voie est échantillonnée à 80 kHz. La caméra rapide est gérée indépendamment. La fréquence utilisée est de 10 kfps (10000 images par secondes).

La partie commune du `script` à toutes les données acquises est décrit à la table 3.1. C'est un `script` assez simple pour charger en mémoire les données de l'expérience. Ce `script` est d'ailleurs

TABLE 3.1 – partie commune du `script` à toutes les données acquises

```
from analysis.analysis import *
from analysis.tools import *

ms          = bameTests(['Xp_bame',])

bameConfigureExtraction(ms,({'name':'tension',    'type':'tension',
                             'K':11,'file':'arcvoltage.dat','inc':1},
                             {'name':'intensity', 'type':'intensity',
                              'K':-100.,'file':'current.dat','inc':1},
                             {'type':'cameras'}))
```

exploitable avec n'importe quelle expérience respectant la structuration de la base de données (section 3.3.2).

Transformées de Fourier : Pour l'analyse du couplage des signaux acoustique et intensité, la première étape consiste au chargement des deux signaux en mémoire active avec la fonction `bameConfigureExtraction`, puis la seconde, de les extraire de la `bameTest` avec la balise `getValues`. Cette procédure est détaillée dans le `script` présenté à la table 3.2.

TABLE 3.2 – `Script` pour le traitement du signal acoustique en cours de soudage

```
bameConfigureExtraction(ms,({'name':'micro',
                             'type':'microphone',
                             'K':1./0.049,
                             'file':'micro.dat',
                             'inc':1},))

i = ms[0].getValues('intensity')
ti= ms[0].getTimes('intensity')
u = ms[0].getValues('tension')
tu= ms[0].getTimes('tension')

mic=ms[0].getValues('micro')
tmic=ms[0].getTimes('micro')

[ci,fi,ai]=bameGetFft2(ti,i)
[cm,fm,am]=bameGetFft2(tmic,mic)
```

A la fin de ce même `script`, la simplicité de mise en œuvre pour effectuer une Transformée de Fourier Rapide sur ce signal est illustrée (fonction `bameGetFft2`).

Les deux transformées de Fourier rapides des signaux se superposent (figure 3.7). La fondamentale représente la fréquence de transfert du métal.

Transfert de la gouttelette : Dans cette partie, le transfert de la gouttelette de métal est analysé par une comparaison du signal de courant et des images acquises avec la caméra rapide. La fonction `bameConfigureExtraction` est utilisée pour préparer le couplage entre les signaux

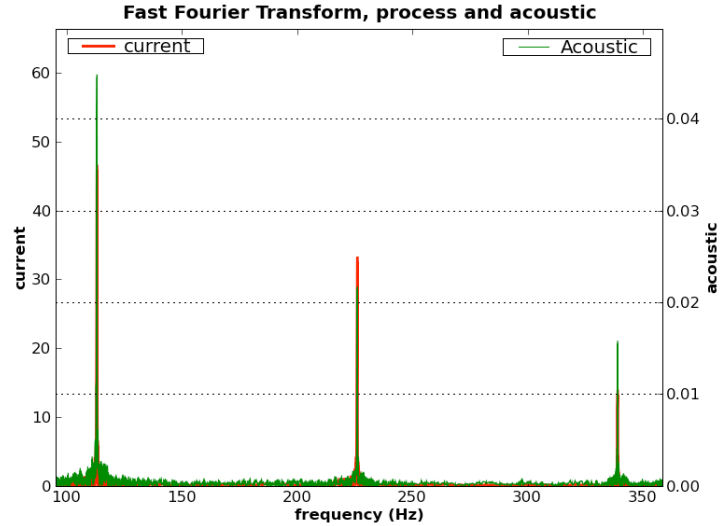


FIGURE 3.7 – Fast Fourier Transform des signaux intensité et acoustique

et les images. Lorsque `cameras` est activé, les noms et instants de prise de vue sont automatiquement donnés. Le résultat est présenté à la figure 3.8.

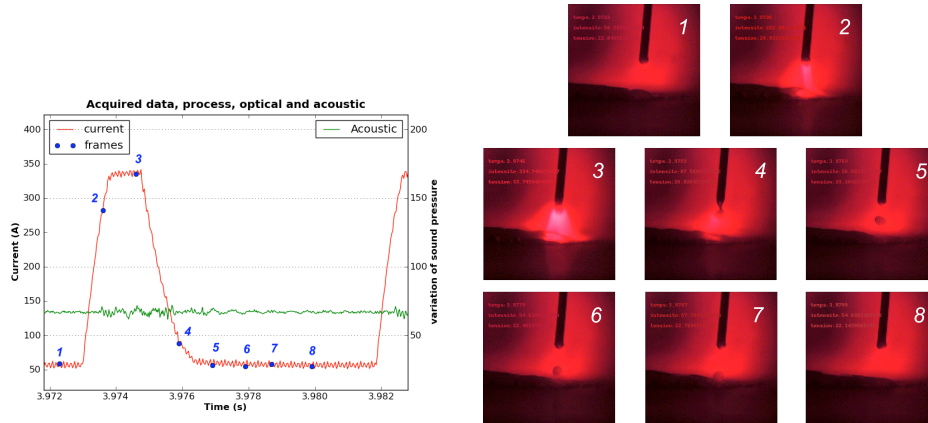


FIGURE 3.8 – Images et le signal intensité synchronisés pour l'analyse du transfert de la gouttelette vers le bain de fusion

Ce résultat confirme la théorie du soudeur pour ce type de transfert [24]. Les images montrent que le détachement de la goutte se fait lors de la chute du courant entre les temps chaud et froid. Il est intéressant de noter que la variation de pression mesurée par le microphone est plus importante lors de la variation des niveaux de courant que lors de l'impact de la gouttelette dans le bain de fusion.

3.4.3.2 Analyse d'une campagne

Plusieurs essais ont été réalisés afin d'étudier l'évolution des efforts en cours de soudage [9]. Avant d'étudier les efforts, les températures doivent être examinées pour voir si les expériences sont répétables. Dans ce cas, la fonction `bameTests` a été utilisée afin de vérifier que les tests effectués à la même énergie donnent des mesures de températures similaires pour les mêmes positions des thermocouples de type K. Les thermocouples T_1 sont situés à 10 mm de l'axe longitudinal de la soudure et T_2 sont à 40 mm. Les thermocouples sont soudés sur l'éprouvette.

Le code pour la comparaison des signaux thermocouples de plusieurs essais est présenté à la table 3.3. La première ligne est utilisée pour définir le nom des essais à exploiter, toutes les autres lignes du `script` sont génériques à l'ensemble des tests. Dans `bameConfigureExtraction`, `K_thermo` est renseigné par la base de données de calibration des capteurs.

TABLE 3.3 – Script de comparaison des signaux thermocouples pour plusieurs essais

```
ms=bameTests(['DTM_08122009_8','DTM_08122009_6','DTM_10122009_6','DTM_10122009_4'])
bameConfigureExtraction(ms,
                        config=({'name':'TJ','type':'thermocoupleK',
                                'file':'thermo1.dat','K':K_thermo,'inc':5},
                                {'name':'TI','type':'thermocoupleK',
                                'file':'thermo2.dat','K':K_thermo,'inc':5}
                                ))

Tj = bameGetValues(ms,'TJ',offset=False)
Ti = bameGetValues(ms,'TI',offset=False)
ts = bameGetTimes(ms,'TJ')
leg=[]
for i in range(len(Tj)):
    intens = int(ms[i].getIntensity())
    chaine = ' '+str(intens)+'A '
    leg.append(chaine+' T1');leg.append(chaine+' T2')
    plot(ts[i],Tj[i],ts[i],Ti[i],linewidth=3)
    hold('on')
```

La figure 3.9 présente le signaux des thermocouples T_1 et T_2 pour les expériences :

- DTM_08122009_8;
- DTM_08122009_6;
- DTM_10122009_6;
- DTM_10122009_4.

On constate que la répétabilité est bonne pour chacune des énergies utilisées que ce soit en terme des niveaux de températures atteintes ou dans la forme de leur évolution au cours du temps. L'homogénéité thermique de l'éprouvette semble atteinte au delà des 500 secondes d'acquisition. Ces résultats donnent également un gradient thermique dans la direction transversale à l'axe de la soudure selon les deux positions des thermocouples T_1 et T_2 . Dans le chapitre suivant, une partie de ces résultats sera comparée à des simulations thermo-mécanique.

3.5 Traitement d'images en soudage à l'arc

L'observation des phénomènes en soudage à l'arc est primordiale pour la compréhension des mécanismes. Une quantification géométriques des entités mises en jeu au cours du soudage permettrait de confirmer des tendances observées en simulation (taille et forme de bain) ou de quantifier de manière précise la régularité de phénomènes et donc la qualité d'un réglage. L'exemple des images du transfert de la gouttelette (section 3.4.3.1) permet une observation couplée aux paramètres de soudage. Ce traitement de données du premier ordre est intéressant pour une analyse descriptive du transfert. Or, de nombreuses quantités pourraient être extraites

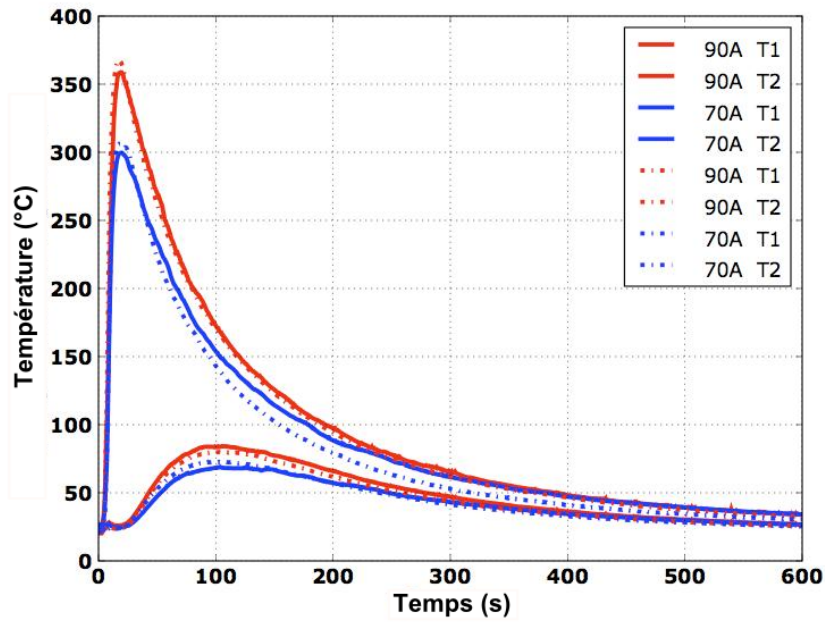


FIGURE 3.9 – Mesures thermocouples pour deux énergies

de ces images, comme la taille de la gouttelette, sa vitesse de transfert et ce toujours couplées aux paramètres de soudage. Ces quantités sont souhaitables pour une analyse des temps et longueurs caractéristiques.

Kovacevic et al [85] ont développé un algorithme de traitement d'images capable de détecter le contour d'un bain de fusion TIG en temps réel à l'aide d'un éclairage laser afin d'optimiser le contraste du bain de fusion vis-à-vis de la partie solide de l'éprouvette. Nordbruch et al [62] montrent qu'il est possible de détecter les gouttes en cours d'un transfert pulsé en GMAW, en utilisant l'ombroscopie comme technique optique (cf. section 2.4.4.4) afin d'avoir un bon contraste entre les gouttes et la zone d'arc, combinée avec des algorithmes pour le traitement des images. Enfin J.P. Planckaert et al [63] ont travaillé sur un algorithme de traitement d'image pour l'étude d'un transfert métallique en GMAW par court-circuit (cf. section 1.3.2.1).

Basée sur ces études, une bibliothèque d'analyse d'images a été développée au cours de l'ANR TEMMSA JC par Edward Romero² tentant d'intégrer ces développements. Dans cette section, les principales caractéristiques et la mise en œuvre sur les problématiques rencontrées dans cette thèse sont détaillées.

3.5.1 erCv

erCv est conçu pour la détection de contour et l'analyse géométrique de bains de fusion (GMAW et GTAW), et de gouttelettes transférées dans l'arc (GMAW). C'est une bibliothèque modulaire développée en langage C++ permettant des analyses en temps réel et dont certains modules sont portés dans l'interpréteur python pour un couplage avec la BAME. Cette librairie se compose de quatre modules (figure 3.10) :

Traitement de l'image : L'environnement d'une opération de soudage à l'arc est source de bruits pour l'acquisition d'images entre l'électrode du procédé et l'éprouvette. Le rayonnement de l'arc électrique, les projections métalliques et les fumées de soudage constituent les principales sources de bruits. La bibliothèque permet de diminuer certains bruits tel que le reflet

2. Post Doctorant 2008-2010, LMGC UMR 5508, ANR JC 2007 - TEMMSA

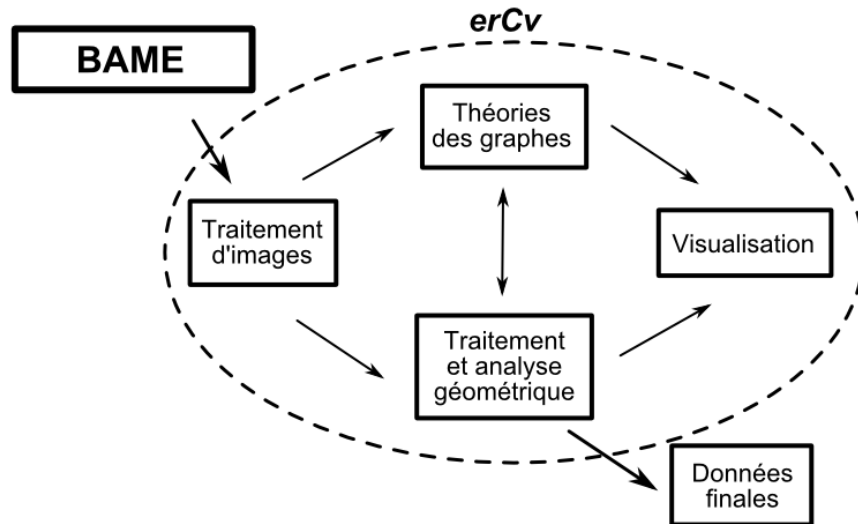


FIGURE 3.10 – Schéma de la structure interne d’erCv

de l’électrode sur le bain. Ce module contient les premiers algorithmes de traitement comme la segmentation par comparaison d’échantillons, des filtres de détection de gradient et des méthodes basées sur les histogrammes. Des procédures de calibration automatique des images sont intégrées dans ce module.

Traitement géométrique et analyse : Ce module utilise une bibliothèque d’algorithmes et d’objets géométriques³. Les principaux objets interfacés sont les triangulations, les alpha shape, les domaines convexes et les polygones.

Ce module permet de transformer les points extraits d’un filtrage en segments à l’aide d’un objet alpha shape. Il est également chargé de calculer les données géométriques des éléments analysés comme la surface du bain de fusion, le volume des gouttes transférées ainsi que la détermination des axes principaux.

Théories des graphes : Pour calculer les données géométriques des éléments analysés, il est nécessaire d’extraire le contour de ces éléments à partir de l’image. Une fois les segments extraits de l’image, les contours doivent être fermés. Deux critères sont alors utilisés : la longueur ou la condition de fermeture. Les segments sont interfacés dans une bibliothèque gérant et travaillant sur les graphes⁴ et permettant d’appliquer ces conditions.

Visualisation : Ce module est un ensemble de fonctions utilisées pour exécuter, afficher et/ou enregistrer les différentes étapes du traitement de l’image.

Pour gérer les analyses d’images avec les signaux synchronisés, un module permettant une interface entre erCv pour le traitement d’images via la classe `bameErCvAnalysis` de la BAME a été développé.

erCv possèdent trois fonctions d’analyse de base :

1. `erWeldPoolAnalysis` : pour la détection de contour du bain de fusion ;
2. `erMetalTransfertAnalysis` : pour la détection de gouttes transférées ;

3. CGAL : <http://www.cgal.org>

4. boost : `:graph`

3. **erMacroDropAnalysis** : pour la détection de la surface libre du bain de fusion en GMAW.

Deux exemples vont être traités, permettant d’appréhender les procédures de **erCv** et les couplages avec les signaux.

3.5.2 Bain de fusion en GTAW

Le premier exemple concerne la détection du contour d’un bain de fusion en soudage TIG statique. Ce simple essai peut servir à la validation de simulation numérique. Pour une simulation thermo hydraulique, l’évolution de l’interface solide-liquide en fonction de l’entrée (le flux de chaleur) est la première quantité à comparer [32].

Au niveau expérimental, cet essai permet de déterminer le temps de réponse pour atteindre la stabilisation du bain pour une pièce en fonction de l’échelon d’intensité.

Dans le cadre de cette application, une caméra rapide associée à un éclairage laser à diode ont été utilisés pour l’acquisition des images du bain de fusion. La technique optique pour filtrer l’arc électrique est celle présentée dans le chapitre 2. Il s’agit de réflexion spéculaire en mode continu (figure 3.11).

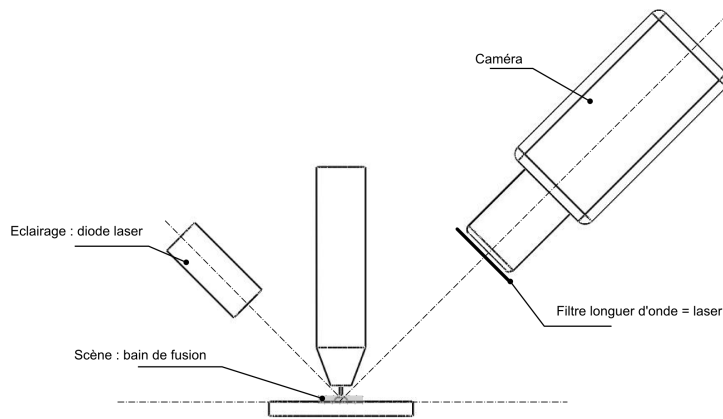


FIGURE 3.11 – Dispositif expérimental pour la détection de contour du bain de fusion en GTAW

3.5.2.1 Calibration des images

Avant toute expérience, la première étape consiste à réaliser une mesure étalon une fois la caméra parfaitement réglée. Cette étape permet d’extraire des quantités géométriques de dimensions réelles lors du traitement des images (figure 3.12).

3.5.2.2 Traitement des images

Pour le traitement des images, **bameErCvAnalysis** est utilisé en précisant la fonction d’analyse, **erWeldPoolAnalysis** pour la détection de contour du bain de fusion, la fonction de calibration de l’image (cf. section 3.5.2.1) et d’un critère pour la sélection des images à traiter (du plus simple comme une image sur deux à un critère plus compliqué comme une image pendant le temps froid d’un régime pulsé).

La figure 3.13 présente quelques images du bain de fusion en cours d’établissement, complétées du contour détecté automatiquement. Des traitements de lissage pour l’atténuation des bruits (principalement des halos) et l’enlèvement de reflets sur quelques images sont observables.

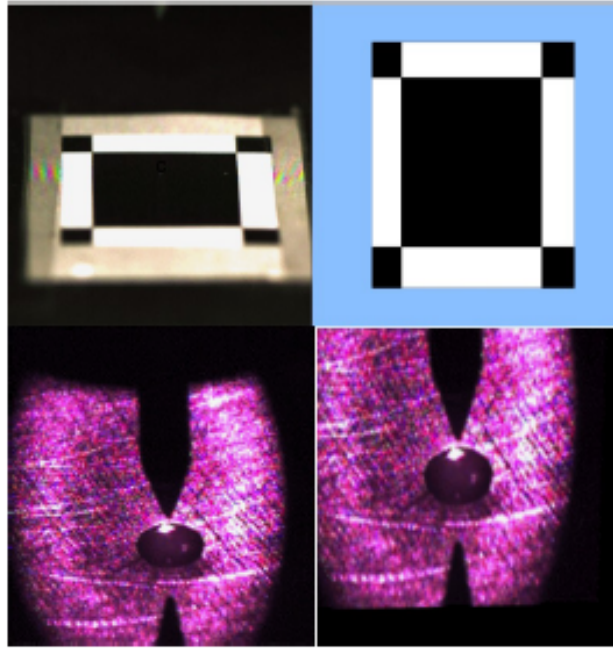


FIGURE 3.12 – Image de l'échiquier pour corriger les perspectives des images du bain de fusion

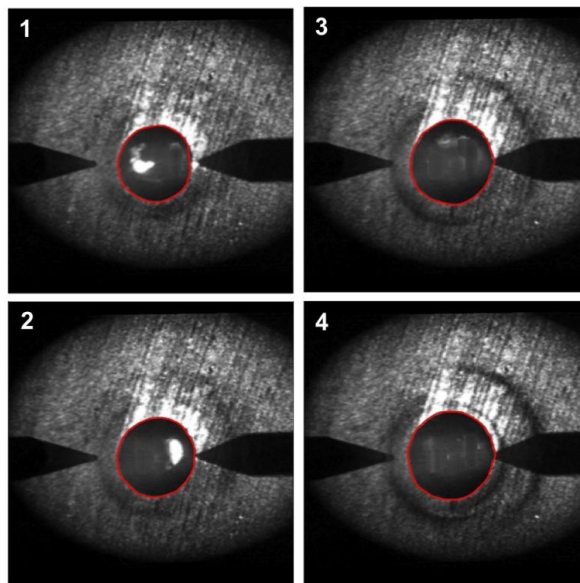


FIGURE 3.13 – Détection de contour du bain de fusion en GTAW, certains reflets ont pu être supprimés

La durée du traitement ne dépasse pas la seconde. Cette même fonction d'analyse génère en sortie un fichier contenant le polygone du contour pour chaque image. Chacun de ces fichiers est lié à un instant de prise de vue pour lequel la BAME permet d'extraire tous les points de mesures acquis (procédé, thermique, etc.).

3.5.2.3 Traitement des quantités

A partir de ces fichiers "contours", les quantités géométriques comme l'aire ou le rayon du bain de fusion peuvent être extraites. Par exemple sur la figure 3.14, l'évolution de l'aire du bain de fusion en GTAW est montrée en fonction du temps, pour une consigne de courant donnée ($I = 110A$).

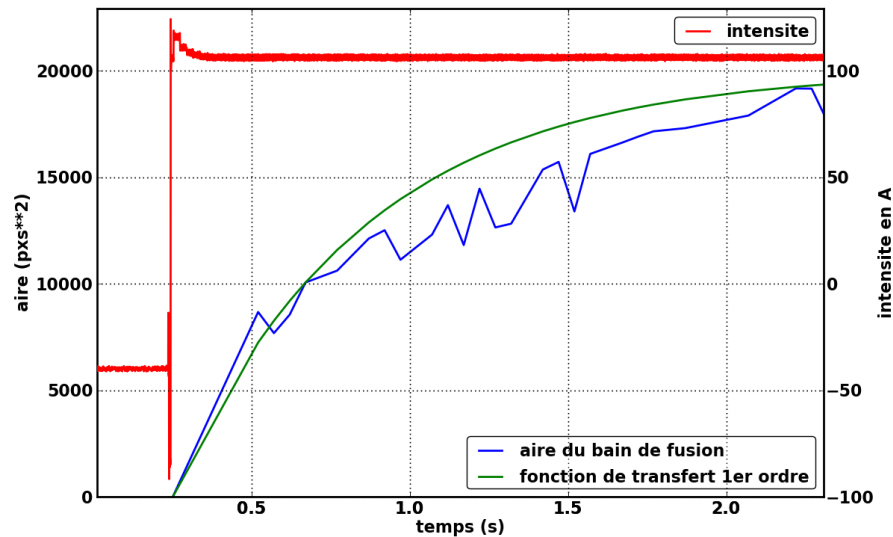


FIGURE 3.14 – Evolution de l'aire du bain de fusion en cours de soudage TIG et la consigne courant

Le temps de réponse pour l'établissement du bain de fusion statique pour ce mode opératoire est de 0,65 s pour cette géométrie en supposant une fonction de transfert du premier ordre.

3.5.3 Gouttelette transférée en GMAW pulsé

Un autre exemple pour tester les performances de **erCv** est celui de l'étude d'un transfert métallique pulsé en GMAW. Le contour des gouttes va être détecté durant leur vol libre. La connaissance du contour de la goutte permettra de déterminer la position de son centre d'inertie mais aussi d'appréhender sa trajectoire et ses oscillations.

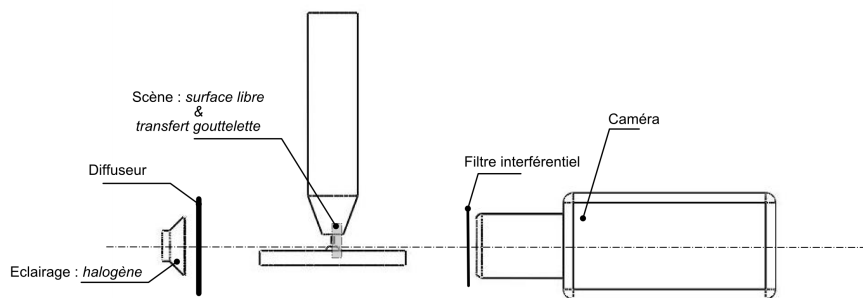


FIGURE 3.15 – Dispositif expérimental pour l'étude du transfert pulsé en GMAW

Une opération de soudage MIG statique est instrumentée en procédé et optique. Le dispositif optique utilisé (figure 3.15) est celui par ombroscopie (cf. section 2.4.4.4). Cette technique garantit l'homogénéité des contrastes de l'image afin de visualiser assez nettement les gouttes transférées entre l'électrode fusible et le bain de fusion. Elle a pour autre avantage de ne pas nécessiter de correction des perspectives de l'image avant l'extraction des quantités dimensionnelles (axe de la caméra perpendiculaire à la scène, figure 3.15). La fonction de calibration pour ce dispositif optique correspond seulement à un coefficient (px -> mm).

3.5.3.1 Traitement des images

Comme pour la détection du contour du bain de fusion, la classe `bameErCvAnalysis` a été utilisée avec pour l'étude du transfert pulsé la fonction `erMetalTransfertAnalysis`. Le plus délicat dans cet exemple reste la définition du critère de pré-sélection des images concernant uniquement le transfert des gouttes. En effet la vidéo concerne 2 à 3 secondes de soudage. Lors d'un régime pulsé, on sait que le détachement d'une goutte se fait entre le temps chaud et le temps froid et son impact dans le bain de fusion durant le temps froid. A partir de ces propriétés, il a été programmé une fonction de pré-sélection d'images pour ce type d'analyse. Ainsi, on optimise le temps de traitement des données. L'introduction de `erCv` dans la bibliothèque de traitement des données permet facilement de traiter ce genre de problèmes puisqu'à chaque image les signaux procédé sont connus.

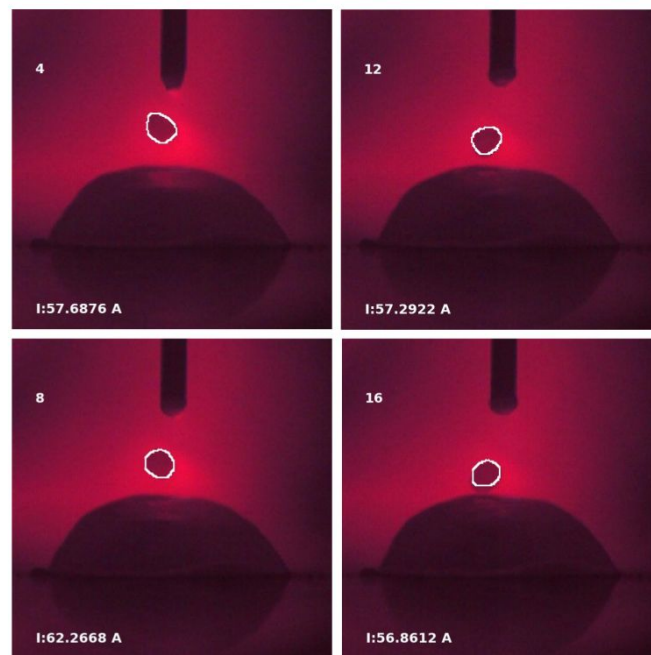


FIGURE 3.16 – Images du transfert d'une gouttelette avec détection de contour

En sortie de cette fonction, le contour des gouttes transférées sont sauvegardés dans les fichiers associés à chaque image traitée (figure 3.16).

Le fonctionnement de `erMetalTransfertAnalysis` est vérifié. Ce type de traitement s'exécute en des temps très courts (de l'ordre de quelques secondes) pour une centaine d'images ce qui permet d'envisager son utilisation pour du contrôle en temps réel.

3.5.3.2 Traitement des quantités

Ces contours de gouttes sont des données brutes à partir desquels la fonction de `erCv` pour l'étude des transferts extrait les coordonnées du centre d'inertie, la taille et le "fit" géométrique.

Ces quantités sont stockées dans un fichier `.geo`. L'évolution de la trajectoire de la goutte durant son vol libre est tracé à la figure 3.17.

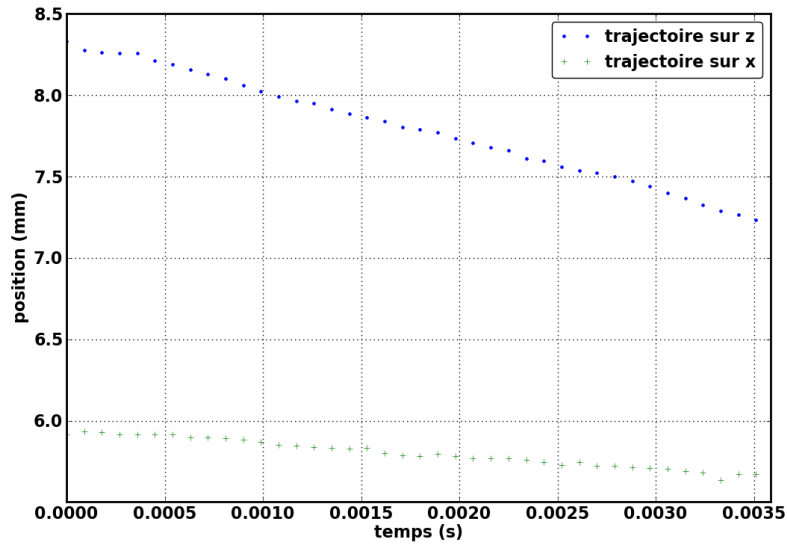


FIGURE 3.17 – Trajectoire de la gouttelette décomposée en x et y en fonction du temps

On constate que la goutte n'évolue pas seulement sur l'axe y. Ce qui indique que la trajectoire n'est pas rectiligne pour cette période. De plus, on observe également que les points décrivant la trajectoire portée sur y, évoluent quasi-linéairement. On a alors une vitesse d'évolution de la goutte quasi-constante. Cette analyse peut être globalisée sur une centaine de pulsations du courant, donc de gouttelettes, afin d'appréhender la stabilité du transfert.

3.6 Conclusion

L'ensemble de l'approche expérimentale multiphysique a été présenté. Les outils pour l'acquisition (plateforme de soudage) et l'exploitation automatisée des données avec la **BAME** et **erCv** sont opérationnels. Des exemples ont été donnés permettant d'ouvrir des pistes pour certaines optimisations ou le contrôle des procédés.

La durée complète pour l'analyse d'une séquence vidéo échantillonnée à 10 *kfps* de 2 secondes, comptant le traitement des images (plusieurs centaines), l'extraction des quantités géométriques avec les paramètres procédé et la visualisation de quelques dizaines d'images de contrôle pour la détection de la goutte, est d'environ 2 minutes.

Ces outils doivent être à présent utilisés via des applications concrètes. Les chapitres 4 & 5 font justement l'objet de trois études distinctes pour les trois objectifs de la thèse :

1. compréhension des physiques induites ;
2. validation de la simulation numérique ;
3. investigation pour des solutions de contrôle.

Le seul point commun à ces trois items, est la recherche de l'optimisation de l'opération de soudage à l'arc.

Chapitre 4

Etudes pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc

4.1 Introduction

Les trois objectifs visés par le développement des outils du chapitre 3 sont :

1. compréhension des physiques induites au cours du procédé ;
2. validation de la simulation numérique ;
3. investigation de solutions de contrôle.

Afin d'illustrer la mise en place des outils d'analyses d'essais pour répondre à ces objectifs, deux exemples vont être traités :

1. Mesure d'efforts en soudage GTAW
2. Etude acoustique en GMAW

Le premier exemple portera sur la mesure des efforts de bridage au cours du soudage et au cours du refroidissement. L'objectif est de montrer comment des résultats expérimentaux peuvent dialoguer avec ceux issus de la simulation numérique et comment ils sont complémentaires dans ce type de mesure.

Le deuxième exemple traite de la possibilité de contrôle de la stabilité du procédé par des mesures acoustiques. L'objectif est alors dans un premier temps d'appréhender la pertinence de nouveaux moyens de contrôle, puis de les valider.

Ces deux exemples montrent des études originales associées au soudage à l'arc. Ils permettent de visualiser la simplicité d'utilisation des outils mis en place.

4.2 Mesures d'efforts en soudage GTAW

L'analyse des distorsions induites au cours du soudage demeure une des préoccupations principales des bureaux des méthodes voulant assembler des tôles minces. Les distorsions induites par le soudage sont de différents ordres : (i) contraction longitudinale (ii) contraction transversale (iii) variation angulaire et (iv) instabilité élastique. Les distorsions sont souvent dues aux couplages de différents mécanismes physiques tels que les effets induits par la thermique, le comportement structural de l'assemblage [99] et les propriétés des matériaux [86]. Si l'influence de la position du bridage par rapport au cordon semble important, peu de travaux étudient l'interaction de celui-ci avec les distorsions [97; 135]. Dans cette partie, un dispositif original de mesure d'efforts au cours du soudage, présenté au chapitre 2, est utilisé. Les efforts de liaisons au cours du soudage donnent des informations sur le comportement du matériau et du cordon sur le comportement mécanique de l'assemblage.

L'analyse des distorsions est souvent empirique. La simulation est un outil puissant pour la prédiction des distorsions sur des assemblages de grandes tailles. Elle permet l'amélioration du séquençement des phases à l'aide de modèles numériques. Sur de telles structures (tore d'ITER par exemple), les calculs demeurent longs à mettre en place et induisent bien souvent des calculs locaux-globaux.

Dans cette partie, la validation d'un dispositif permettant d'analyser expérimentalement l'influence du bridage est réalisé. Sur les résultats expérimentaux, une analyse est faite et les techniques de comparaison des essais au calcul sont détaillées sur une éprouvette. Afin de compléter l'analyse expérimentale sur ces essais, des mesures complémentaires ont été réalisées et permettent d'apprécier la création des distorsions au cours du procédé suivant les conditions de bridage.

4.2.1 Expérimentation

Un ensemble d'essais sur des éprouvettes en 304 L est réalisé afin d'appréhender l'évolution des efforts, de déformations au cours du soudage.

4.2.1.1 Les éprouvettes

Deux types d'éprouvettes (figure 4.1) sont utilisées afin d'appréhender l'évolution des efforts de bridage au cours du soudage. Les éprouvettes sont de forme rectangulaire, leurs dimensions sont données dans le tableau 4.1. Les appendices (10x10 mm) sur les largeurs de la tôle permettent de réaliser les phases d'amorçage et d'extinction de l'arc libre de contrainte.

Les éprouvettes 1d sont réalisées afin d'obtenir un comportement équivalent mécanique pour cette zone. Un seul capteur d'effort bride l'éprouvette de part et d'autre du cordon. En supposant un comportement homogène, la sollicitation du cordon due aux conditions de bridages peut être appréciée. Les éprouvettes 2d ont été conçues afin d'observer ce comportement équivalent dans des conditions d'autobridage.

Type d'éprouvette	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)	Nombre de bridage
1d	20	150	1.5	2
2d	190	150	1.5	4

TABLE 4.1 – Géométries des éprouvettes pour la mesure des efforts

4.2.1.2 Le dispositif expérimental

Le dispositif utilisé est constitué d'une torche TIG fixe et d'une table X-Y mobile, pilotée en vitesse (figure 4.1). Les capteurs d'efforts sont fixés sur un montage d'usinage.

Deux configurations d'essais ont été testées :

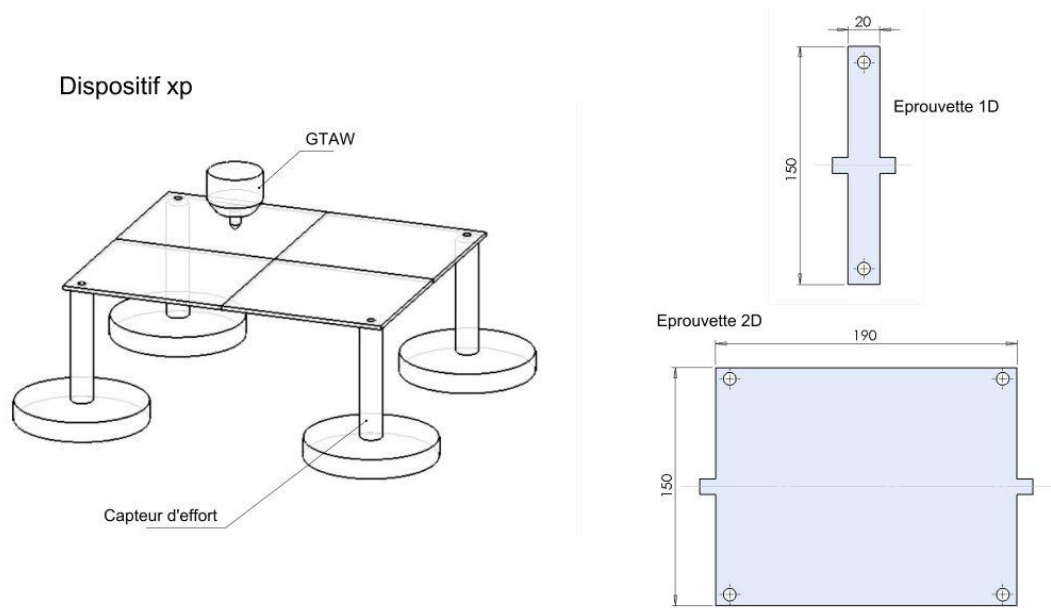


FIGURE 4.1 – Dispositif expérimental et éprouvettes

1. Essais avec bridage : la tôle est fixée sur ces capteurs, réalisant ainsi une liaison complète entre la tôle et la table ;
2. Essais sans bridage : les capteurs ne servent que de supports pour la tôle.

Les essais sont effectués avec les paramètres (tension, intensité, vitesse,...) de soudage constants. La vitesse d'avance est de 40 cm/min, l'intensité de 70 A en courant lisse et la tension d'environ 12 V. Des lignes de fusion sont réalisées d'un appendice à l'autre. Le montage des tôles sur le capteur doit être réalisé avec précaution. Les tôles sont encastrées sur les capteurs. Ce type de montage est hyperstatique. Un mauvais alignement des capteurs entraînera une précharge initiale avant soudage pouvant modifier le comportement mécanique du cordon au cours du soudage.

4.2.1.3 Mesures au cours du soudage

Les dispositifs de protection contre le rayonnement et le courant (figure 4.2) sont ceux décrits au chapitre 2.

Afin d'obtenir les temps significatifs d'apparition des efforts, une acquisition de 10 minutes à 20 Hz est réalisée pour les signaux thermiques et mécaniques. Les paramètres procédés sont acquis à 10 kHz pendant tout le temps de soudage (8 s). Les signaux sont ensuite centralisés sur des cartes d'acquisition, assurant la synchronisation des différentes données.

Mesures des températures : Sur les éprouvettes 1d, deux thermocouples K gainés, ont été placés à 10 mm et à 40 mm du centre de l'éprouvette. Ces thermocouples sont disposés relativement loin du bain afin d'apprécier l'énergie thermique qui diffuse dans le solide. Ils permettent de connaître le temps caractéristique de diffusion et d'homogénéisation de la température.

Mesures d'efforts : Deux types de capteurs ont été conçus pour mesurer des efforts ou des moments au niveau des bridages. Les efforts sont uniquement ceux dans le plan (X dans la direction de soudage et Y dans la direction perpendiculaire) de la tôle. Les moments mesurés résultent de la flexion dans la tôle. Sur l'éprouvette 1d, uniquement des capteurs mesurant les efforts dans le plan ont été disposés pour brider l'éprouvette. Sur l'éprouvette 2d, les capteurs d'efforts et de moments ont été disposés de manière symétrique. Des essais préliminaires ont permis vérifier la faible élévation de température des capteurs après essai (moins de 30 °C).

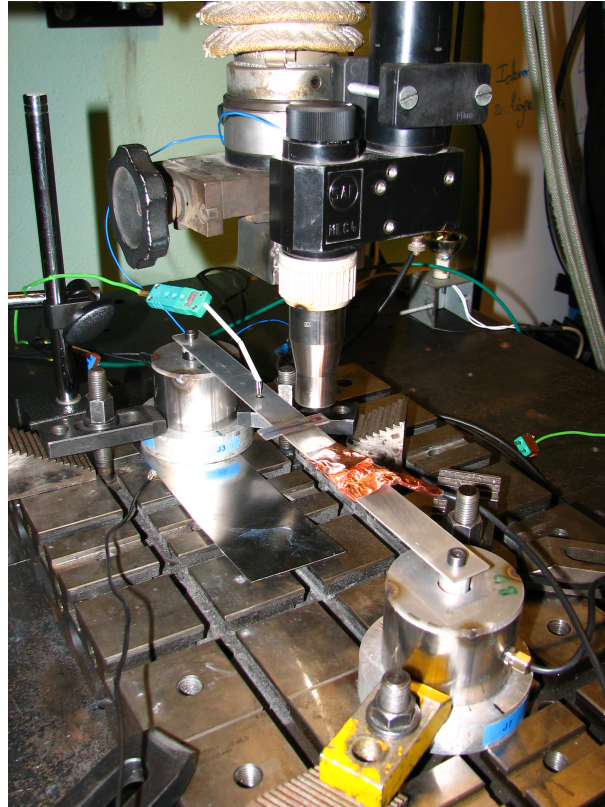


FIGURE 4.2 – Photo du dispositif expérimental

Mesures des déformations : Sur les éprouvettes 2d, des jauges sont placées à 60 mm du cordon dans la direction de soudage. Deux jauges, de part et d'autre de la tôle, sont montées en demi-pont afin d'observer les déformations induites par la flexion au cours du soudage et du refroidissement. Une évolution rapide du signal dénotera une instabilité élastique de type flambage [99].

Mesures de distorsions : Les mesures de distorsions post-mortem sont un indicateur sur le niveau de bridage atteint vis-à-vis d'une éprouvette non-bridée.

Les distorsions sont mesurées sur les tôles débridées à l'aide d'un scanner tridimensionnel **Breuckmann** mesurant les formes par projection de moiré et corrélation. Une surface est ensuite reconstruite à partir d'un nuage de points dans un modèle numérique.

Macrographie : Des macrographies sont réalisées post-mortem. La position des macrographies est référencée dans le dossier **metallurgy** et le contour de la macro est sauvegardé dans un fichier surface de type **.g** qui peut être chargé dans certains visualiseurs géométriques.

4.2.2 Modélisation numérique

La littérature sur l'étude des distorsions en soudage à l'arc est abondante [99; 136]. Cette partie décrit sommairement le modèle numérique utilisé. L'objectif principal est de comparer des résultats expérimentaux et numériques afin d'illustrer la méthodologie développée pour lier les données expérimentales à celles issues d'une modélisation. Quelques ingrédients du modèle numérique sont brièvement décrits.

4.2.2.1 Modèle géométrique

Un modèle géométrique pour décrire le comportement des essais est mis en place. L'assemblage des tôles minces induit souvent des distorsions angulaires qui indiquent des sollicitations de type flexion. Dans une analyse couplée thermo-mécanique diverses modélisations géométriques peuvent être envisagées :

- Un modèle plaque ne prenant pas en compte un gradient thermique dans l'épaisseur ;
- Un modèle volumique avec un raffinement important dans la zone autour de l'apport de chaleur ;
- Un modèle mixte, volumique au voisinage de l'apport de chaleur, et plaque dans les zones plus lointaine.

La dernière solution permet de réduire le nombre d'éléments en couplant éléments de type plaque et éléments de type volumique. Cette solution a néanmoins le désavantage de nécessiter des éléments de couplages (éléments rigides) entre les deux types d'éléments (plaque et brique). Le modèle géométrique obtenu est montré sur la figure 4.3.

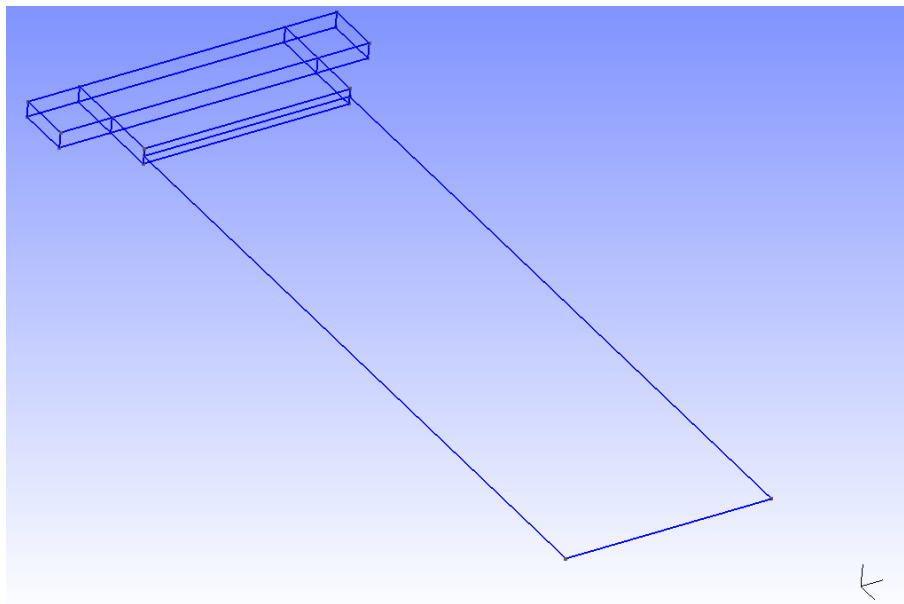


FIGURE 4.3 – Modèle géométrique pour l'étude des conditions aux limites au cours du soudage

La géométrie choisie pour l'interaction simulation - expérimentation correspond à l'éprouvette 1d. Ce modèle sera traité sous **SYSWELD** en effectuant une analyse thermique puis une analyse mécanique.

4.2.2.2 Analyse thermique

L'analyse thermique du procédé de soudage TIG doit prendre en compte un certain nombre de phénomènes pour tenter d'appréhender la distribution thermique dans la pièce au cours du soudage.

Les phénomènes principaux pris en compte [137] sont :

1. L'apport de chaleur du à l'arc sous forme d'une distribution non uniforme volumique (source goldak 3d) ;
2. Variation des propriétés physiques thermiques du matériau en fonction de la température ;
3. Prise en compte des conditions de supports dans la modélisation ;
4. Pertes par convection et radiation.

Le premier phénomène permet d’approcher l’énergie qui transite dans le bain. Pour le second, aucune analyse thermo-métallurgique n’est réalisée au vue des faibles modifications métallurgiques que subit le matériau au cours des cycles de soudage. Les travaux de Zhao [138] sur la prise en compte ou non de la thermo-dépendance des paramètres physiques lors de la modélisation thermo-mécanique d’une opération de soudage seront utilisés.

La compatibilité thermique entre les éléments volumiques et les éléments plaques, est assurée par l’intermédiaire de la connectivité des nœuds. Ce type de modèle est cohérent si la zone de connexion des deux modèles se situe dans une zone où la température dans l’épaisseur du volume est quasi-uniforme.

Les paramètres choisis sont donnés dans le tableau 4.2 . On choisit des paramètres différents dans les deux types de maillages afin de prendre en compte de manière grossière une différence d’histoires thermiques.

Paramètres physiques	Volume	Plaque
Conductivité $W/mm/K$	0.005 – 0.01	0.0175
Capacité $J/kg/K$	400. – 600.	400.
Densité kg/mm^3	7.810^{-6}	7.810^{-6}
Coeff Echange $W/mm^2/K$	10^{-6}	10^{-6}

TABLE 4.2 – Paramètres physiques thermiques

4.2.2.3 Analyse Mécanique

L’analyse s’appuie sur le même modèle géométrique. La difficulté est de relier les éléments plaques avec leur six degrés de liberté avec les éléments volumiques n’ayant pas de degrés de liberté de rotation. La compatibilité des déplacements est assurée par des éléments rigides. Ces éléments rigides (éléments poutres artificiellement rigidifiés) sont liés aux éléments volumiques sur la tranche (épaisseur) de ces éléments et s’appuient sur les nœuds des éléments plaques.

Les conditions aux limites assurent la symétrie, d’un coté et de l’autre, l’influence du capteur d’effort est modélisée. Le capteur n’ayant pas une rigidité suffisante lui permettant d’imposer un blocage total de la liaison (tableau 4.4), il convient de modéliser son action sur la structure par une conditions aux limites de type Robin. Plusieurs nœuds d’éléments plaques sont aussi bloqués afin de contraindre les rotations.

Une partie délicate est la prise en compte du comportement mécanique du matériau. Le comportement non linéaire du matériau est pris en compte avec un comportement plastique à écrouissage non-linéaire. Le matériau choisi n’a pas de comportement de plasticité de transformation ce qui allégera le modèle. Cette partie nécessite bien souvent des identifications coûteuses en essais pour quantifier le comportement du matériau en température.

Le matériau utilisé est du 304L, les propriétés mécaniques utilisées sont décrites dans le tableau 4.3.

Paramètres mécaniques	20 °C	1000 °C
Module d’Young (MPa)	180000	20000.
Coefficient de dilatation	4.e-6	5.e-6
Limite élastique (MPa)	145.	15.

TABLE 4.3 – Paramètres mécaniques du matériau

Zhu et al [138], après une étude paramétrique, ont montré qu’un certain nombre de paramètres pouvait être pris constants et que d’autres pouvaient être moyennés sur toute la plage de température. Les deux paramètres principaux étant la limite élastique et la dilatation, ces paramètres seront pris thermo-dépendant et choisis dans la littérature.

Rigidité Effort	1000 N/mm
Rigidité Moment	180000 N

TABLE 4.4 – Rigidités du capteur d’efforts

4.2.3 Résultats

Dans cette partie, différents résultats expérimentaux seront analysés. Sur les grandes éprouvettes 2d, le temps de soudage est d’environ 50 secondes et celui de l’acquisition de 10 minutes. L’énergie apportée à la pièce est de 40950 J . Le temps de retour à l’ambiante est environ 8 minutes. La partie se terminera par la comparaison d’un modèle numérique avec un essai pour une éprouvette 1d.

4.2.3.1 Mesures d’efforts

La figure 4.4 montre les résultats issus d’une acquisition pour un capteur situé du côté de l’amorçage pour une éprouvette 2d. Afin de mieux visualiser les efforts, ils ont été tracés avec des signes opposés. En réalité, l’action du bridage sur la tôle est une action de traction dans les deux cas en fin d’opération de soudage. Durant tout le temps de soudage, les efforts sont faibles alors qu’au cours du refroidissement, ils deviennent de plus en plus importants.

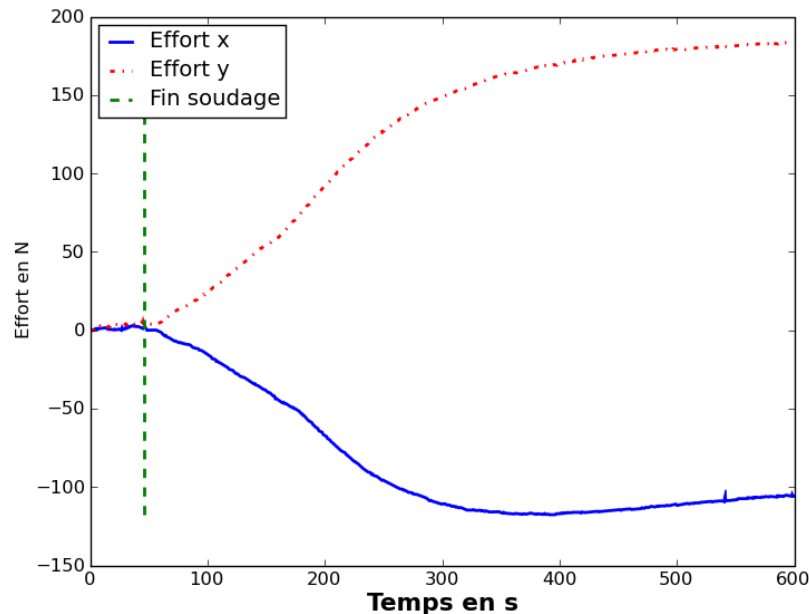


FIGURE 4.4 – Evolution des efforts dans le plan au cours du temps (temps de soudage environ 50 s)

Trois zones peuvent se distinguer sur la figure 4.4. La première correspond au temps de soudage. Les efforts de liaisons sont quasiment nuls au niveau des liaisons. Une deuxième zone correspond à la diffusion de la chaleur dans la tôle et au début du refroidissement. La troisième phase correspond au retour à l’équilibre en température.

4.2.3.2 Mesures des déformations

La figure 4.5 présente, l’évolution du signal du demi-pont de jauges au cours du soudage d’une éprouvette 2d. Le demi-pont permet de quantifier localement la flexion suivant un axe

perpendiculaire à la ligne de fusion.

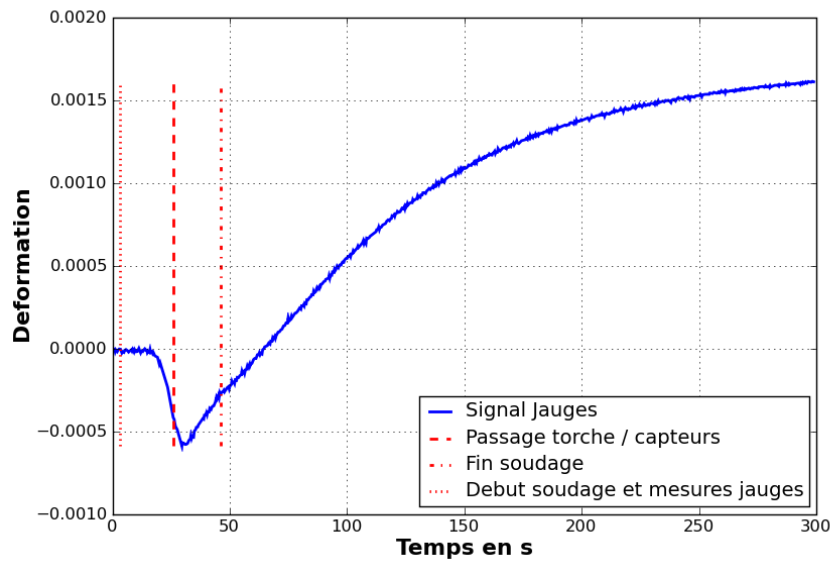


FIGURE 4.5 – Evolution de la déformation de flexion au cours du temps (temps de soudage environ 50 s)

Au passage de la torche, une sollicitation de flexion dans la direction perpendiculaire au cordon est fortement induite. Comme pour les efforts, il y a une forte évolution des déformations entre 100 et 200 s correspondant au temps d'homogénéisation en température de la tôle. En fin de sollicitation, en supposant un comportement de traction, la contrainte de flexion avoisine les 150 MPa au point de mesure. La jauge est hors des zones à forts gradients thermiques. Ce niveau de contrainte dans une zone où les contraintes sont quasi-homogènes laisse envisager une forte sollicitation en flexion au voisinage du cordon. Ceci est également corrélé avec les mesures de distorsions. Avec les conditions de soudage choisies, aucune discontinuité au cours du temps n'est apparente, ce qui laisse penser qu'il n'y a pas de bifurcation de type élastique dans ce cas. Un examen de la tôle après essai semble valider cette analyse.

4.2.3.3 Mesures de distorsions

Sur la figure 4.6 sont représentées les distorsions pour le soudage d'une éprouvette 2d, les deux tôles soudées avec et sans bridage. Pour ces deux types de conditionnement, des formes identiques en forme de col ou de selle à cheval avec les mêmes courbures sont observées, de même que de fortes distorsions angulaires.

Qualitativement, entre les deux configurations, on observe une différence sur les maxima de 1 mm et sur les points minima de 1 mm. Ces écarts peuvent sembler peu importants mais sur une amplitude de distorsion hors plan de 6 mm, cela représente un écart d'environ 30%. Les courbures au niveau du cordon sont relativement symétrique dans la direction de soudage (entre la position d'amorçage de l'opération et celle de l'extinction de l'arc), ce qui semble indiquer une faible influence du déplacement de la torche (de la thermique par exemple) sur la création des distorsions.

4.2.3.4 Comparaison essai-simulation

Une simulation d'une éprouvette 1d soudée en courant lisse de 70 A à une vitesse de 40 cm/min a été réalisée dans le but d'appréhender les techniques automatiques de comparaison de

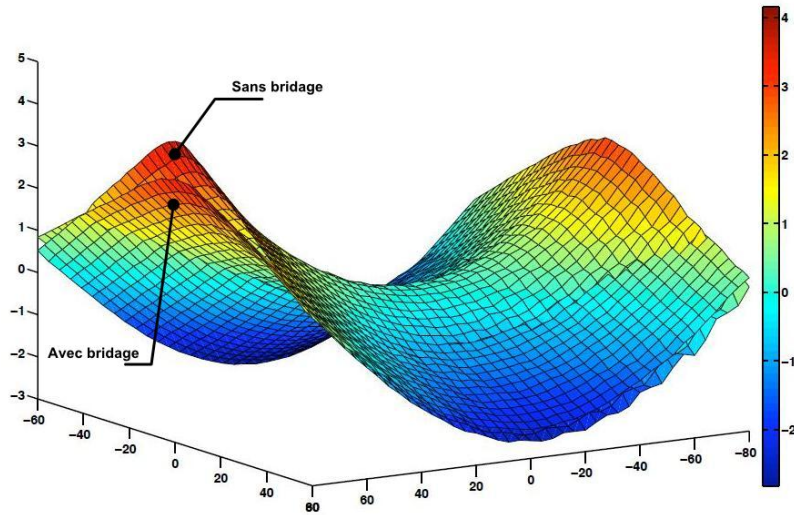


FIGURE 4.6 – Distorsions hors plan (toutes les dimensions sont en mm)

la simulation et de l'expérimentation. Différents types de mesures sont à comparer :

- Mesure ponctuelle (déformations, températures,...) ;
- Mesure géométrique sur les frontières de domaines.

Pour comparer les résultats expérimentaux et numériques de manière systématique, la synchronisation spatiale et temporelle entre ces résultats doivent être assurée. Quelques exemples de comparaison sur l'éprouvette 1d à l'aide des outils développés seront montrés.

Thermique : Dans un premier temps, les résultats des thermocouples sont comparés sur la figure 4.7 et la partie bain de fusion-macrographie est montrée sur la figure 4.8.

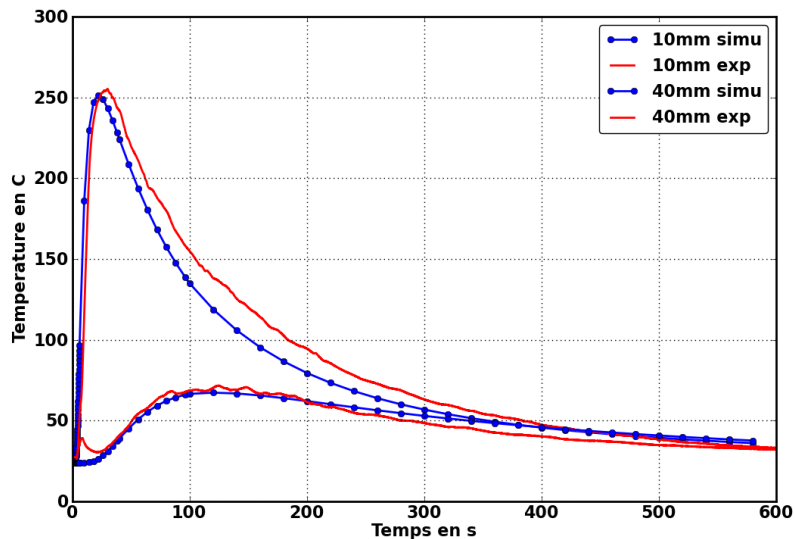


FIGURE 4.7 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour un thermocouple à 10 mm et à 40 mm pour un acier inoxydable soudé en courant lisse et 70 A

La position du thermocouple est connue dans le fichier `info.don` dans le repère associé à l'essai. Les capteurs sont positionnés par rapport au point de départ du soudage. La recherche

d'une valeur de thermocouple dans un calcul numérique peut se faire en recherchant la valeur en un point si le thermocouple a été positionné dans une zone à faible gradient de température. Les tendances des thermocouples expérimentaux et des points de mesures du calcul sont proches (cf. figure 4.7). On peut rappeler que le coefficient d'échange est pris constant et qu'il joue un rôle important dans les phases de refroidissement où il y a un léger écart entre les mesures et les résultats numériques.

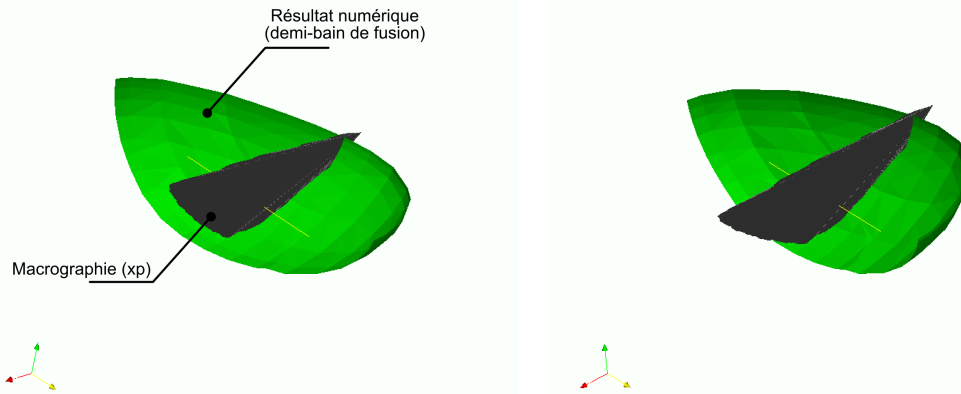


FIGURE 4.8 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques du bain de fusion pour un soudage en courant lisse et 70 A

La comparaison d'un résultat type de macrographie (coupe post-mortem) nécessite l'intégration de quelques décalages géométriques (cf. figure 4.8). En général, les macrographies sont réalisées dans la zone quasi-stationnaire du cordon. La difficulté principale de la synchronisation spatiale provient du calage dans la direction perpendiculaire au soudage puisque le cordon peut être non symétrique. Pour cette direction, divers outils ont été mis en œuvre afin de caler la macrographie par rapport au bord du bain de fusion numérique suivant des critères géométriques (point le plus à gauche, centre de gravité). Un léger calage manuel est bien souvent nécessaire. Sur la comparaison bain-macrographie, la profondeur de bain est un peu surestimée dans le cas de la simulation. Cette surestimation provient d'une part de la mauvaise appréciation du rendement que l'on voit également sur les thermocouples mais aussi sur les paramètres de la source Goldak et entre autres le paramètre de distribution en profondeur qui agit sur la répartition du flux dans cette direction. L'intérêt pour ce type de visualisation pour la validation de la simulation numérique semble évident. La bonne comparaison des résultats entre les résultats expérimentaux et numériques permettront de mieux appréhender les gradients mis en jeu.

Mécanique : Pour l'éprouvette 1d, les niveaux d'efforts sont faibles. Ce niveau d'effort peut être attribué à :

- la faible rigidité du capteur d'effort vis-à-vis de l'échantillon ;
- des distorsions initiales au niveau de la tôle qui transformeraient une partie des dilatations thermiques en des sollicitations de flexion.

Dans le but d'analyser les méthodes de comparaison entre simulation et expérimentation, seule la faible rigidité a été prise en compte dans le modèle numérique. Ceci nécessite un niveau supérieur d'interaction entre la simulation et les résultats expérimentaux puisqu'une des conditions aux limites doit directement être imposée en fonction de la position du capteur. Une fois la condition imposée, le résultat est alors retrouvé dans la base de données numérique en connaissant la position de cette condition. La condition aux limites de type Robin induit un résultat numérique du capteur dépendant de la rigidité du specimen. La rigidité mécanique du coupon dépend des propriétés du matériau en fonction de la température.

Dans la comparaison entre simulation et expérimentation, la mesure ponctuelle des efforts permet de donner une information globale sur le comportement du matériau. Pour corréler l'information ponctuelle du capteur d'effort avec le calcul, un certain nombre de calages a été nécessaire, en particulier au niveau du comportement mécanique du matériau. En effet, l'évolution de l'effort de bridage est directement liée à la dilatation et à la limite élastique. A partir du moment où les tendances de la thermique semblent cohérentes, les divergences entre les résultats numériques et expérimentaux proviennent d'une mauvaise approximation du comportement matériau. Après quelques calages et en particulier celui de la chute des propriétés mécaniques (Limite élastique et module d'Young) en fonction de la température, les résultats semblent satisfaisants (figure 4.9) et permettent de mettre en évidence la complémentarité de la simulation et de l'expérimentation, soulignant ainsi la nécessité de développer des outils couplés simulation/expérimentation.

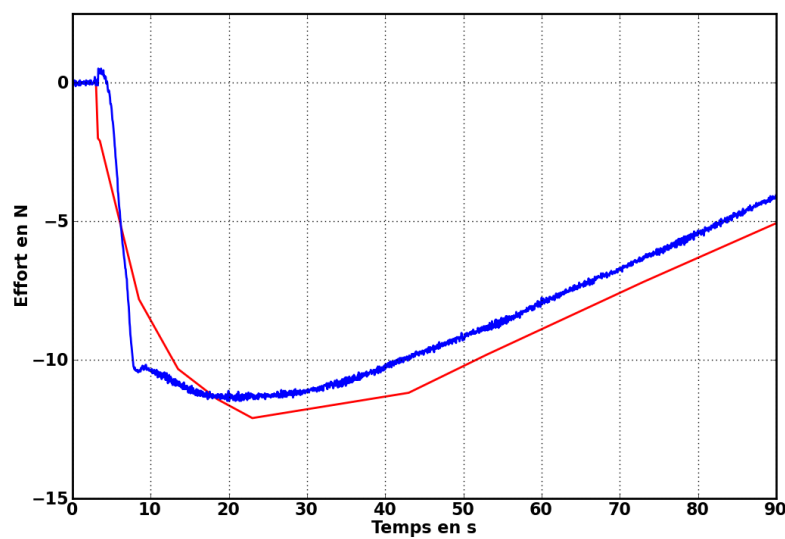


FIGURE 4.9 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour l'effort en X mesuré avec le capteur pour un acier inoxydable soudé en courant lisse et 70 A

4.2.4 Discussion

Au vu des résultats, le dispositif expérimental est validé. Le type de résultats et la comparaison avec la simulation numérique démontre également l'intérêt pour ce type de mesure. La recherche automatique d'information numérique ou expérimentale ayant été mis en place, un outil de méthode inverse pourrait alors être développé.

Dans les essais, l'effet de l'action mécanique du bridage peut être déterminé sur les distorsions finales de l'assemblage. Ces efforts mesurés au cours du soudage sont une information supplémentaire pour la validation de la simulation numérique. Ce dispositif peut être intéressant lors d'études sur l'instabilité élastique.

Les signaux de déformations sur les éprouvettes 2d montrent une accélération des distorsions au début de la phase de refroidissement. La tôle dans cette partie a tendance à se déformer plastiquement. Ceci est probablement un effet combiné entre des distorsions faibles créées au cours du soudage et la contraction au cours du refroidissement.

Dans l'opération de soudage, la mécanique est pilotée par la thermique induite par l'arc. A titre d'exemple, les corrélations des signaux (figure 4.10) des deux thermocouples avec l'effort sur un capteur sont tracés. Les fonctions de corrélation ont un maximum au voisinage de 320 et 450 secondes signifiant que les signaux de thermocouples donnent les meilleures informations

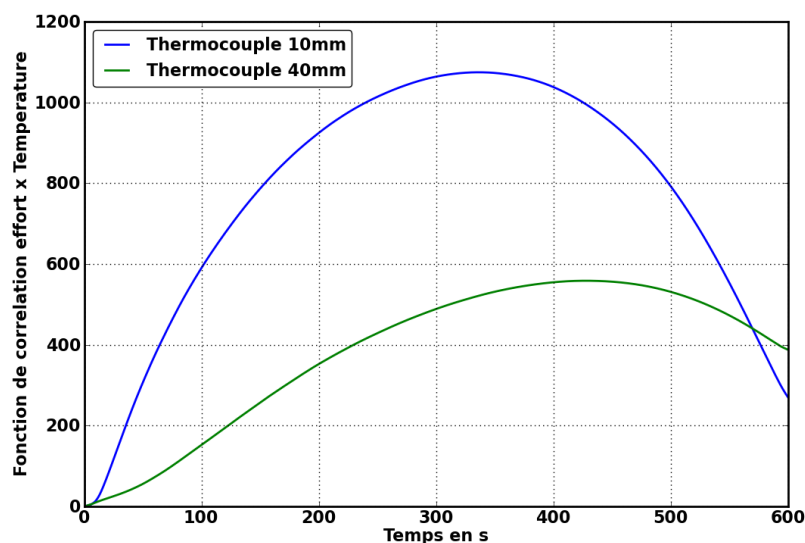


FIGURE 4.10 – Corrélation sur le temps d’acquisition entre les signaux d’effort en X et les thermocouples

sur le couplage thermo-mécanique. Ceci semble corrélérer avec ce qui est observé au niveau des déformations, puisqu’une première phase (30 s après le soudage) voit le développement de déformations incompatibles puis des déformations homogènes (contraction) se mettent en place dans l’éprouvette. Une analyse plus détaillée (mesures de champs thermiques) permettrait de mettre en évidence les temps et les tailles caractéristiques mis en œuvre dans la création des distorsions en étudiant les fonctions de corrélation.

Ce dispositif permet également de quantifier l’influence du bridage par la mesure des actions de liaisons. Une étude systématique pourrait alors permettre d’améliorer la position des bridages lors de l’établissement d’un Descriptif de Mode Opérateur en Soudage (DMOS).

4.3 Etude acoustique en GMAW

Cette section présente une application procédé pour le développement de techniques de contrôle à distance du soudage. Cet exemple permettra de montrer l’intérêt d’une approche de mesures couplées pour la validation de nouvelles techniques de contrôle.

Au cours de l’opération de soudage, peuvent apparaître des défaillances comme un manque de gaz de protection, un mauvais réglage des paramètres procédés, etc. En pratique, le soudeur est capable de suivre et d’ajuster les paramètres du procédé en temps réel. Or, dans le cas de réalisation soudée dans un contexte hostile ou pollué (nucléaire, pétrochimie), il est évident que l’opérateur ne peut se tenir à proximité de la zone d’intérêt. C’est pour cette principale raison que le développement de techniques pour contrôler le procédé à distance est intéressant.

Un bon transfert de l’électrode fusible en MIG-MAG par court-circuit est caractérisé par un bruit de ”mitraillette”, alors qu’un transfert pulsé à un ”bourdonnement”. A partir de ce constat, l’analyse du signal acoustique pour contrôler le procédé MIG-MAG peut être intéressante. Cette solution a pour avantages vis-à-vis du contrôle du procédé par une mesure tension d’arc, d’être sans contact direct avec la source et de ne pas perturber le procédé.

Dans la littérature de nombreux auteurs ont traités le sujet [139; 140; 141; 142; 143; 144]. Sans aller jusqu’à proposer une méthode de détection des défauts en cours de soudage, ils com-

parent différents régimes de courant, et traitent le signal acoustique par des décompositions spectrales, afin de déterminer les harmoniques caractéristiques selon un mode opératoire donné.

4.3.1 Expérimentation

L'idée principale de cette étude réside dans la possibilité de diagnostiquer l'état du procédé de soudage avec des mesures d'acoustique. Les mesures acoustiques quantifient une variation de pression à l'endroit du capteur. La variation de pression au niveau du capteur dépend d'une variation de pression importante à un autre endroit (machine tournante,...). Il est reconnu [140] que la pression d'arc est proportionnel à la puissance électrique transmise dans l'arc. La variation de pression excitant le microphone est principalement due à la variation de pression au niveau du plasma qui se propage ensuite dans le milieu environnant. Les réflexions des ondes sur le bain peuvent jouer un rôle dans le niveau de pression du capteur. Cette étude a pour objet de déterminer dans quelle mesure l'analyse du signal du capteur acoustique peut nous informer sur un défaut de stabilité au niveau du plasma. En transfert, le comportement du plasma peut être complexe puisque la hauteur d'arc dépend du comportement de la goutte. Une fois celle-ci en vol entre l'électrode et la pièce, la gouttelette interagit avec les écoulements dans le plasma et les lignes de courant. L'intensité de courant accélérant les particules a tendance à créer cette augmentation de pression. Si les lignes de courant sont modifiées, la variation de pression créée le sera aussi.

Pour apprécier la possibilité de contrôle du procédé à l'aide d'un micro, différents essais vont être réalisés. Le premier correspond à un essai de référence où le dépôt en MIG pulsé est géré par le générateur. Un deuxième essai sera réalisé avec une modification volontaire de la hauteur d'arc. Le dernier sera une coupure gaz.

4.3.1.1 Protocole expérimental

Une ligne de fusion ($V_{soudage} = 60 \text{ cm.min}^{-1}$) sur une éprouvette de S235 épaisseur 4 mm sera l'expérience de référence en régime pulsé (en mode synergique) pour une vitesse fil de 6 m.min^{-1} . L'acquisition porte sur des paramètres procédé, du signal acoustique, mais aussi les images du transfert métallique et du bain de fusion afin d'appréhender un mauvais comportement de l'arc. Pour l'acquisition d'images, une caméra rapide (PHANTOM[®] V5.0) à 10000 images par seconde est utilisée. Afin de filtrer l'arc électrique sur les images acquises, et dans le but d'observer le transfert métallique dans le bain de fusion, une méthode optique par ombroscopie a été utilisée. Le dispositif est présenté sur la figure 4.11 avec la position de ces différentes instrumentations vis-à-vis du procédé et de l'éprouvette. Le microphone utilisé est positionné dans la direction du soudage et à proximité du procédé GMAW. Ce matériel est celui présenté à la section 2.4.5.

Trois types d'essais sont réalisés avec les conditionnements suivants :

1. bonnes conditions de soudage : essai de référence ;
2. un défaut de tension d'arc ;
3. un défaut de coupure du gaz de protection.

4.3.2 Résultats

Dans cette section, les résultats des essais préliminaires sont présentés. Ensuite une solution pour le contrôle à distance du procédé avec le signal acoustique est proposée.

4.3.2.1 Essais préliminaires

Le résultat de l'expérience de référence est présenté à la figure 4.12. En rouge le signal de l'intensité, en vert l'acoustique et les points bleus représentent les images référencées à droite de la figure 4.12. La goutte pénètre dans le bain de fusion lors du temps froid du régime pulsé.

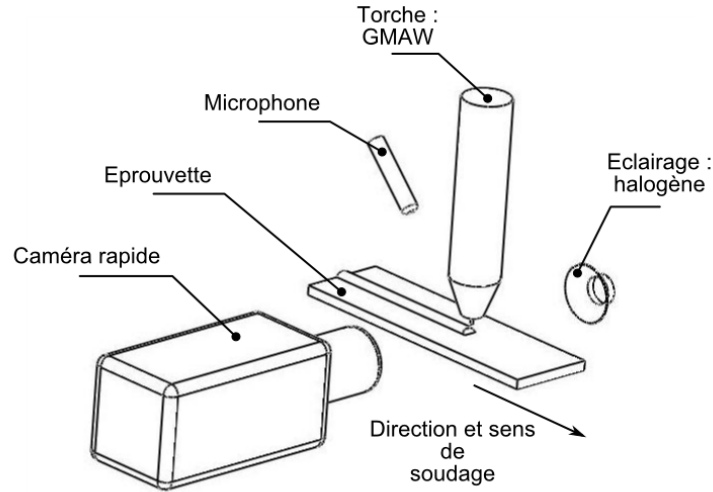


FIGURE 4.11 – Dispositif expérimental pour la mesure acoustique en cours de soudage

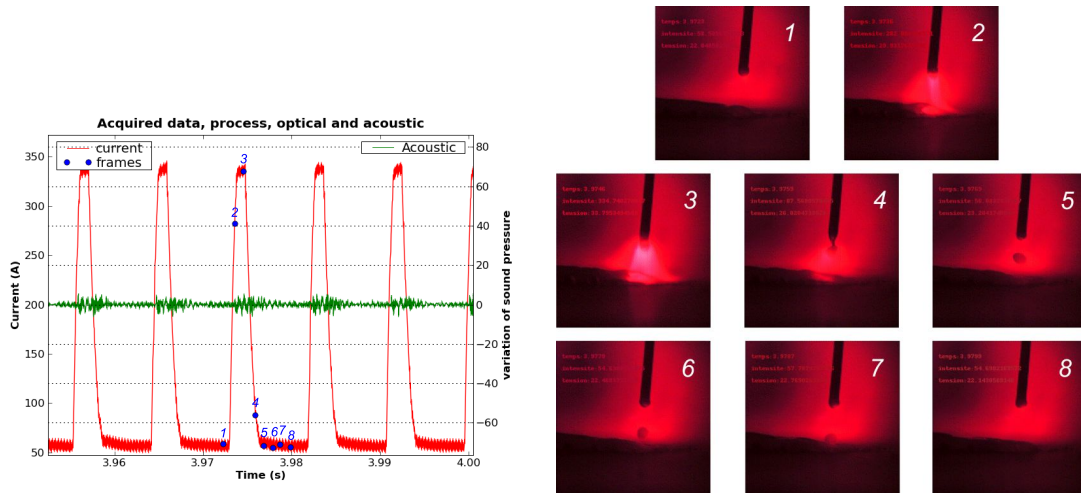


FIGURE 4.12 – Images et signaux synchronisés pour l'analyse du transfert de la gouttelette vers le bain de fusion

On caractérise le contenu fréquentiel de ces signaux par l'obtention de leur transformée de Fourier (figure 4.13). La fréquence fondamentale représente la fréquence du transfert des gouttes dans le bain de fusion. Suite à ce résultat, nous avons choisi de retenir dans un premier temps la fondamentale et les deux premières harmoniques comme une signature de l'expérience de référence (en termes de fréquences et d'amplitudes).

Les expériences suivantes, consistent à provoquer des défauts de soudage de type tension et gaz de protection, afin de comparer les résultats des FFT en fonction de l'essai de référence. Le résultat montre uniquement une variation des amplitudes et principalement celle de la fondamentale (figure 4.13). Le fait que la fréquence de transfert métallique ne varie pas (alors que nous constatons une variation de tension importante pour l'expérience "défaut tension") peut s'expliquer par l'utilisation d'un poste synergique commandé en boucle de courant (cf. section 1.2.1.2). Pour un poste dit conventionnel, on aurait observé une augmentation de la fréquence de gouttes avec la chute de la tension. Le résultat présenté sur la figure 4.13, permet de confirmer que l'utilisation du signal acoustique pour le contrôle du procédé à distance est pertinente.

La dernière expérience avec coupure de l'alimentation du gaz de protection est réalisée. Le signal acoustique ainsi que le cordon de soudure résultant de cet essai sont présentés à la figure

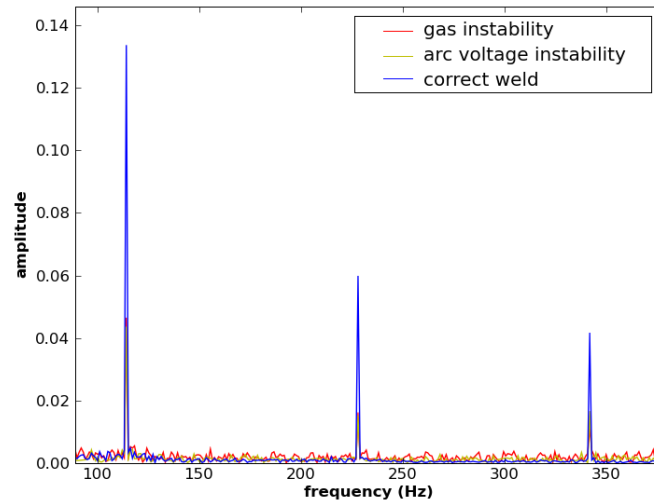


FIGURE 4.13 – bameGetFFT des signaux acoustiques pour trois conditions de soudage

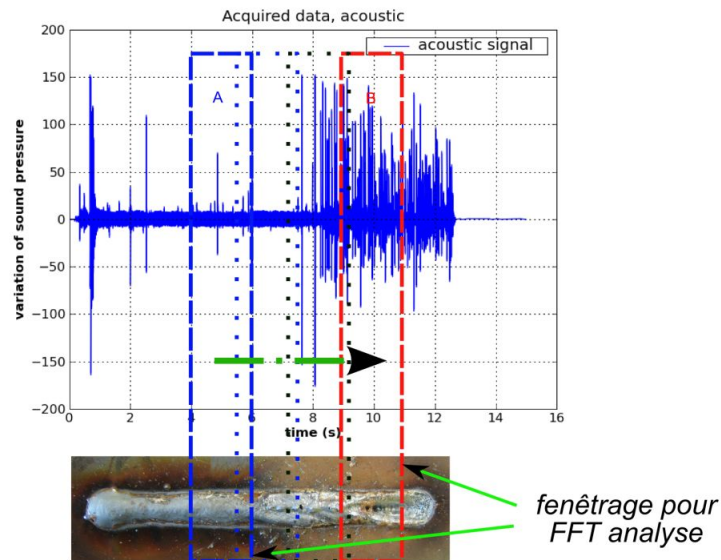


FIGURE 4.14 – Un défaut apparaît en cours de soudage : signal acoustique et la soudure résultante

4.14. Les courbes obtenues montrent que le signal acoustique permet de détecter l'instant associé à l'apparition du dysfonctionnement en cours de soudage. Cependant, il est difficile d'identifier la nature du problème et donc impossible de solutionner le problème à distance.

Afin d'améliorer cette solution de contrôle, une proposition pour le diagnostic par acoustique est proposée.

4.3.2.2 Contrôle à distance

Les dynamiques des phénomènes dans l'arc ont des temps caractéristiques tellement faibles que le contrôle devra être très rapide et sur des courtes périodes. Dans cette partie, des Transformées de Fourier sur le signal acoustique de l'arc sont fenêtrées sur quelques périodes du signal afin de voir la possibilité de contrôle avec cette technique. Pour avoir un indicateur de bon dépôt de la goutte, un signal de référence correspondant à une période de bon dépôt de la goutte est

soustraite aux transformées de Fourier de la fenêtre. Le signal de référence est sélectionné en observant les signaux électriques et les films obtenus par la caméra rapide, présentant un bon dépôt. La différence entre la transformée de Fourier actuelle et cette transformée de référence est ensuite comparée à un seuil. Il a été choisi de considérer le dépôt instable lorsque la différence maximum entre les harmoniques dépasse le niveau de 0,6. Le résultats sont présentés sur les figures 4.15 et 4.16.

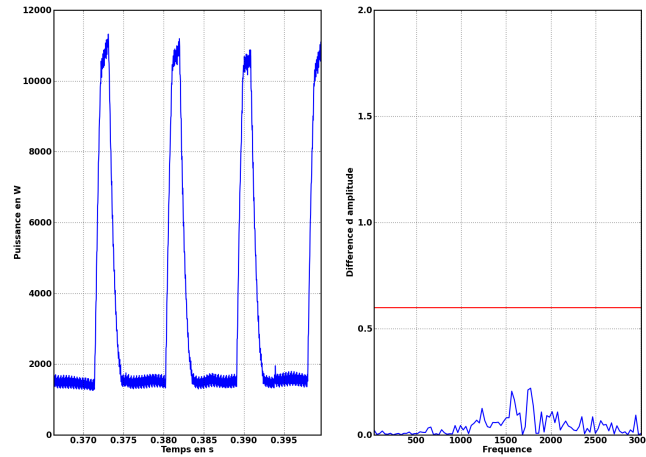


FIGURE 4.15 – Comparaison signal de puissance avec sa transformée de Fourier pour un bon transfert

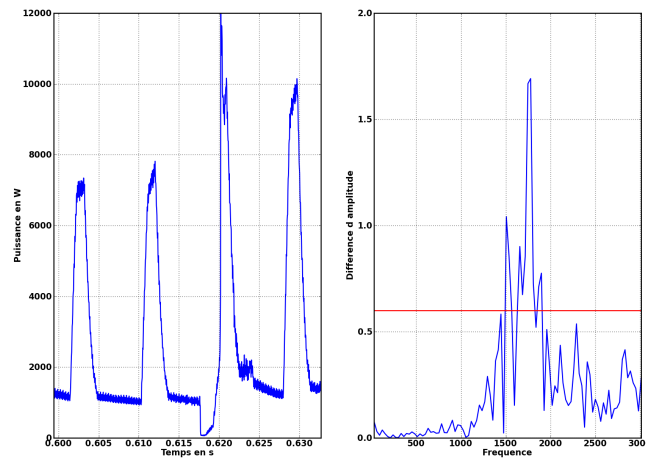


FIGURE 4.16 – Détection d'un mauvais transfert

Ces résultats sont reproduits quelle que soit la période choisie au cours du signal. On remarque que pour l'étude des signaux acoustiques, les harmoniques d'ordre supérieure doivent être recherchées.

L'application en situation industrielle pose le problème du choix de la transformée de référence pour le signal acoustique. La comparaison de deux périodes voisines peut être aussi choisie comme méthode de détection (comparaison par fonction glissante).

4.3.3 Conclusion

L'exemple de l'étude du signal acoustique en soudage MIG-MAG, illustre l'intérêt de développer une approche polyvalente pour l'utilisation de tous types de capteurs en vue de développements de techniques de contrôle à distance en temps réel des procédés de soudage à l'arc. Les mesures couplées permettent de s'assurer du bon transfert.

4.4 Conclusion

A travers les deux études, deux des trois objectifs de l'approche expérimentale multiphysique ont été illustrés.

Le premier concerne l'étude des distorsions par des mesures d'efforts en cours de soudage et durant la phase de refroidissement, croisée avec un modèle éléments finis. Les outils développés pour cette approche (chapitre 3), autorisent l'association de l'expérimentation et de la simulation de manière systématique pour la compréhension et la validation de modèle numérique.

La seconde étude, celle de l'acoustique pour le contrôle du procédé **GMAW** en régime pulsé, démontre la faisabilité pour l'investigation de solution de contrôle des procédés de soudage à l'arc via la même approche.

Pour finir, l'objectif de compréhension des mécanismes physiques induits lors d'une opération de soudage est également possible. L'exemple simple de la mesure de l'évolution du bain de fusion **GTAW** en cours de soudage l'illustre bien (chapitre 3). Les techniques de mesures synchronisées autorisent l'accès et donc l'étude de temps et longueurs caractéristiques mis en jeux (taille de bain pour une énergie donnée, temps caractéristique d'établissement du bain de fusion, etc.). Cette même approche sera utilisée dans le cadre de l'étude du comportement dynamique du bain de fusion **GMAW** en régime pulsé, étude faisant l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5

Comportement dynamique d'une opération de soudage stationnaire en MIG-MAG pulsé

5.1 Introduction

La présence d'interfaces solide-liquide-gaz, et les phénomènes interfaciaux qui s'y rapportent, jouent un rôle extrêmement important dans les procédés dits "à hautes températures" tels que le soudage [1; 145], aussi bien en conditions normales que dans le cas de sollicitations plus extrêmes.

Ainsi, lors du soudage grande vitesse, certaines applications peuvent conduire à l'apparition de phénomènes de humping. Ces phénomènes, en introduisant des défauts caractéristiques au niveau des cordons de soudage (sous la forme d'un chapelet d'amas de métal solidifié, les "humps"), constituent une limite à la vitesse du procédé, donc de productivité. Les premières études expérimentales ont permis de définir le humping comme une série d'ondulations de la ligne de fusion [146]. D'un point de vue physique, un des mécanismes identifiés dans l'apparition du humping est l'instabilité de Rayleigh qui induit une perturbation de l'écoulement de la veine liquide [147]. Beaucoup de ces travaux [59; 61; 148; 149] sont basés essentiellement sur des études numériques, l'expérimentation avec vidéo rapide permettant de valider une partie des résultats. Ce phénomène de humping peut apparaître également avec d'autres matériaux, comme par exemple le dépôt de cire. Schiaffino [150; 151] en propose d'ailleurs une étude très développée, basée sur une analyse dimensionnelle dans le cas d'un dépôt en configuration statique.

Afin de mieux comprendre les mécanismes physiques mis en jeu et leur importance relative, cette étude est basée sur une approche expérimentale permettant d'appréhender les longueurs et temps caractéristiques impliqués dans le comportement d'un bain de fusion en soudage **GMAW** pulsé, statique. La configuration du dépôt de gouttes métalliques est présentée en premier, ainsi que le dispositif et la procédure expérimentale. La campagne expérimentale comporte une série d'essais permettant d'appréhender la sensibilité d'un certain nombre de paramètres.

Cette étude répond principalement à un objectif de compréhension du dépôt métallique et du comportement du bain lors du soudage **MIG-MAG**.

5.2 Définition du système étudié et protocole expérimental

La réalisation d'une opération de soudage GMAW au centre d'une cible métallique circulaire permet la création d'une zone de métal fondu qui se présente sous la forme d'une goutte de métal maintenue liquide par le soudage. Ce type de configuration est largement utilisé pour la mise en place de modèles numériques GMAW [148; 67; 59].

5.2.1 Objet de l'étude, grandeurs et hypothèses

Le but est ici d'étudier la création et l'évolution de la forme de cette macro-goutte en relation avec le dépôt de métal liquide amené par l'électrode fusible. En fonction des paramètres de soudage (énergie, gaz), les dynamiques de croissance de la goutte ou de la membrane peuvent être modifiées.

5.2.1.1 Hypothèses

Les instrumentations conditionnent l'accès aux quantités mises en jeu pour l'étude du comportement de la macro-goutte. La mise en place de l'instrumentation et l'exploitation future des résultats s'appuient sur les hypothèses suivantes :

Au niveau de la macro-goutte :

- axisymétrie du pompage thermique ;
- faible pénétration, le métal fondu est essentiellement sous forme de goutte au-dessus du substrat (rôle sur l'équilibre de la ligne triple) ;
- pertes de métal d'apport par projection négligeables.

Au niveau de la cible solide :

- effet de rugosité du substrat (rôle important dans l'accroche de la ligne triple mais négligé) ;
- température des zones de métal fondu homogène.

5.2.1.2 Définition du système

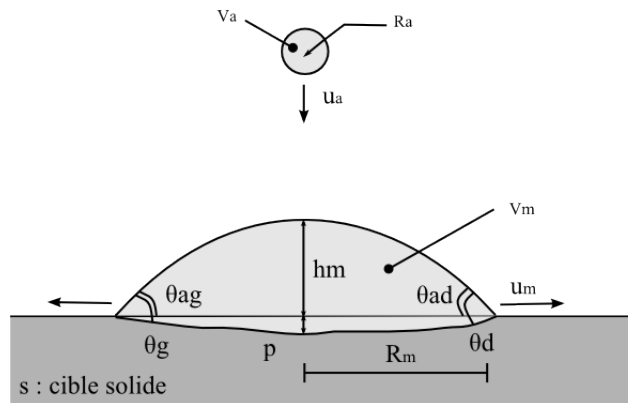


FIGURE 5.1 – Définition du système étudié

La géométrie considérée est définie sur la figure 5.1, où les éléments se rapportant à la cible sont notés s , ceux des gouttes de métal d'apport a et ceux de la macro-goutte de métal fondu m . Les caractéristiques géométriques sont repérées R pour les rayons, V pour les volumes, h pour la hauteur au centre, p pour la pénétration et θ_{ag} , θ_{ad} , θ_g , θ_d pour les angles de mouillage (gauche et droit), respectivement "apparent" et "réel". Les vitesses sont repérées u , respectivement pour la vitesse de chute des gouttes de métal d'apport u_a et pour la vitesse de propagation de la ligne

triple de la macro-goutte u_m (ligne définissant l'interface solide-liquide-gaz). La pénétration (p) est supposée relativement faible, le métal fondu est essentiellement réparti dans la macro-goutte au dessus du substrat. Le métal fondu déposé par l'électrode sert essentiellement à créer et entretenir la macro-goutte.

5.2.1.3 Mécanismes physiques possibles

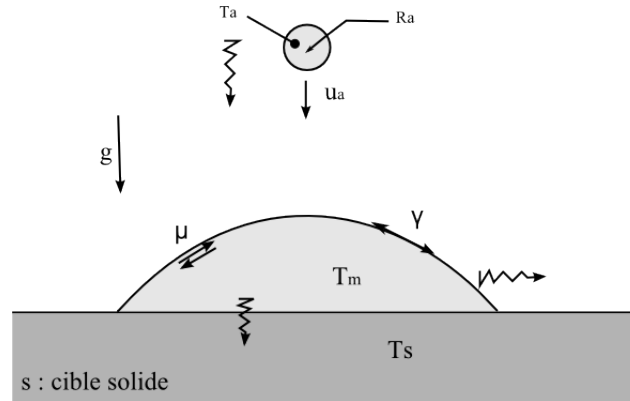


FIGURE 5.2 – Localisation des phénomènes possibles.

Les mécanismes physiques intervenant dans la formation et l'évolution de la macro-goutte sont nombreux, les principaux étant a priori :

- d'abord ceux intervenant pour la conservation de l'énergie :
 1. perte d'énergie par conduction dans la cible ;
 2. énergie/chaleur apportée par arc/gouttes d'apport ;
 3. accumulation d'énergie dans la macro-goutte (pour la maintenir liquide) ;
 4. énergie utilisée pour les changements de phase (solide vers liquide sous la goutte, ou liquide vers solide en solidification).
- ensuite ceux pour la conservation de la quantité de mouvement :
 1. apport de quantité de mouvement par gouttes d'apport ;
 2. effet de gravité (g) dans la goutte ;
 3. effet de tension de surface (γ) le long de l'interface ;
 4. mouvements de la goutte/fluide : viscosité (μ).
- enfin celui pour la conservation de la masse :
 1. apport de matière par gouttes d'apport.

La figure 5.2 la localisation schématique des différents phénomènes ainsi que les paramètres permettant de décrire l'évolution du système comme T_a , T_m , T_s pour les températures de la goutte, de la macro-goutte et de la cible.

5.2.2 Protocole expérimental, traitement des données

Dans cette section sont définis et justifiés : le choix de la cible, le choix des grandeurs mesurées et les méthodes d'extraction des quantités nécessaires à l'analyse du comportement du bain de fusion GMAW.

5.2.2.1 Choix de la cible

Les dimensions de la cible sont définies en essayant de minimiser l'élévation de température moyenne induite par l'opération de soudage. Le critère d'élévation de température moyenne retenu est tel que l'écart de température ne doit pas excéder $50^{\circ}C$. En supposant qu'il n'y a pas de pertes par convection de l'énergie stockée dans la cible (apportée par l'arc électrique), et que les variations de température se font de manière homogène, le bilan thermique, écrit sous sa forme la plus simple appliqué pour un disque de rayon R_{cible} , donne :

$$R_{cible} = \sqrt{\frac{E}{\rho c e \Delta T \pi}} \quad (5.1)$$

avec :

- E pour l'énergie de soudage J
- ρ masse volumique du matériau $= 7800 \text{ kg.m}^{-3}$
- c la chaleur spécifique massique du matériau $= 450 \text{ J.Kg}^{-1}.K^{-1}$
- e épaisseur de la cible mm
- ΔT écart de température $= 50^{\circ}C$

L'énergie de soudage E dépend des paramètres procédé suivant : l'intensité moyenne $I = 150 \text{ A}$, la tension moyenne $U = 25 \text{ V}$, le temps de soudage $t = 4 \text{ s}$ et un rendement du procédé supposé $\eta = 0.65$ (cf. section 1.3.4.2). En se basant sur la courbe définie par la figure 5.5, on constate

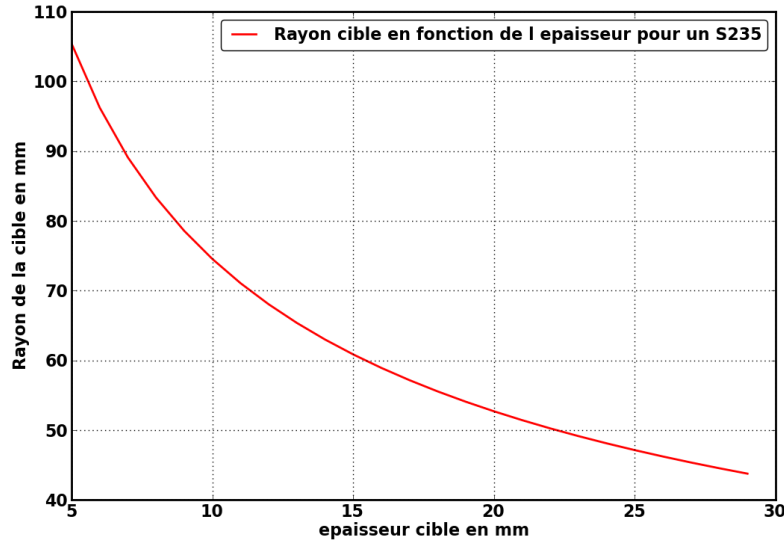


FIGURE 5.3 – Détermination du R_{cible} de la cible

qu'une cible en acier S235 d'une épaisseur de 10 mm et d'un rayon $R_{cible} = 75 \text{ mm}$ permet de répondre aux différents critères pour ces expérimentations.

5.2.2.2 Protocole expérimental

Le principe des essais consiste à effectuer une opération de soudage de 4 à 8 s avec un procédé GMAW pulsé sur une cible métallique de diamètre 150 mm et d'épaisseur 10 mm . Le métal d'apport (ER70S) est amené sous la forme d'un fil de 1 mm de diamètre avec une distance de travail par rapport à la cible (stick out) de 20 mm .

Afin d'appréhender l'influence de différents paramètres de soudage et environnementaux sur le comportement de la macro-goutte, une série de plusieurs tests a été réalisée, à partir d'un essai de référence, repéré R par la suite. Il s'agit des paramètres suivant :

1. temps de soudage (tests repérés S) : pour identifier les différentes phases d'évolution du système ;
2. vitesse de dévidement du fil de métal d'apport (V) : pour étudier l'influence du volume d'apport métallique et de l'énergie délivrée par la source ;
3. fréquence du transfert à énergie identique (F) : pour étudier l'effet de la quantité de mouvement de la gouttelette sur la surface de la macro-goutte. En effet, à chaque pulsation de courant, une gouttelette transfère vers le bain de fusion. La variation de la fréquence de pulsation influe alors sur le nombre de gouttelettes transférées. Aussi, pour une vitesse fil constante et une fréquence de pulsation croissante, la taille des gouttes diminue. La variation de ce paramètre (F) agit alors sur celle de l'énergie cinétique des gouttelettes en vol libre ;
4. température initiale de la cible circulaire (T) : pour modifier le gradient thermique entre métal en fusion et le substrat solide, donc indirectement les tensions superficielles à l'interface liquide-solide de la ligne triple, mais aussi sur le passage à l'état liquide du substrat ;
5. composition chimique du gaz de protection sur la base d'un mélange CO_2 - Argon (G) : pour agir sur les tensions superficielles de la ligne triple à l'interface liquide-gaz. Aussi pour ces essais (G), il faut prendre en compte l'effet du CO_2 sur la longueur d'arc (pour une hauteur d'arc constante), donc sur la tension d'arc soit l'énergie à la source.

La Table 5.1 récapitule l'ensemble de ces tests, et montre les variations de paramètres prises en compte. Ces variations auront pour effets de modifier les quantités énergétiques et de mouvements du système.

TABLE 5.1 – Définition des paramètres expérimentaux utilisés au cours de la campagne d'essais.

Code test	Tps soudage (s)	Vfil (m/min)	Fréq (Hz)	Temp subs (deg celsius)	% CO_2
R	4	6	113	20	8
S	4, 6, 8	6	113	20	8
V	4	4, 6, 8, 10	113	20	8
F	4	6	40, 70, 113, 200	20	8
T	4	6	113	20, 300, 600	8
G	4	6	113	20	0, 8, 18, 30

5.2.2.3 Données expérimentales acquises

Le dispositif expérimental décrit au chapitre 2 est utilisé pour enregistrer les paramètres procédés, en relation avec des mesures localisées de température et l'acquisition vidéo rapide de l'opération, aussi bien au cours de l'opération de soudage que de la phase de refroidissement. L'intensité de courant électrique et la tension sont mesurées à une fréquence de 30 kHz . Les mesures de température s'effectuent avec des thermocouples de type K de 0,5 mm de diamètre disposés respectivement à 20 et 30 mm du centre de la cible.

L'acquisition vidéo de l'opération est effectuée par technique d'ombroscopie (Figure 5.4) avec un éclairage halogène de 250 W et une caméra numérique rapide PHANTOM[®] V5.0 à une fréquence de 4000 images par seconde. Un filtre passe bande (650 nm) est en outre utilisé pour atténuer l'arc électrique afin d'obtenir des images de bonne qualité permettant de caractériser les transferts métalliques et l'évolution de la macro-goutte de métal fondu.

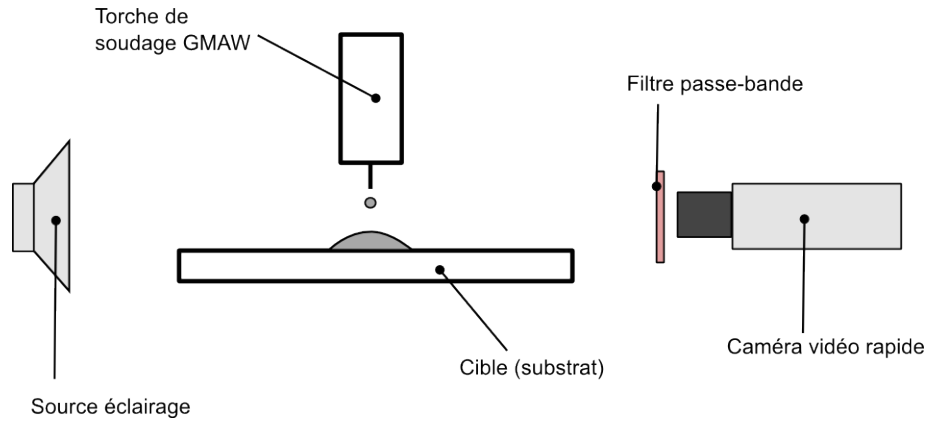


FIGURE 5.4 – Principe des essais, acquisition d’images en vidéo rapide par ombroscopie

5.2.2.4 Stratégies pour le traitement des données

Le flux important de données (procédé, thermique et optique) enregistré pour cette étude nécessite l’utilisation d’outils développés au chapitre 3. L’analyse et l’extraction des paramètres géométriques du système macro-goutte passe par une détection de la surface libre et du contour des gouttelettes en vol libre (figure 5.5).

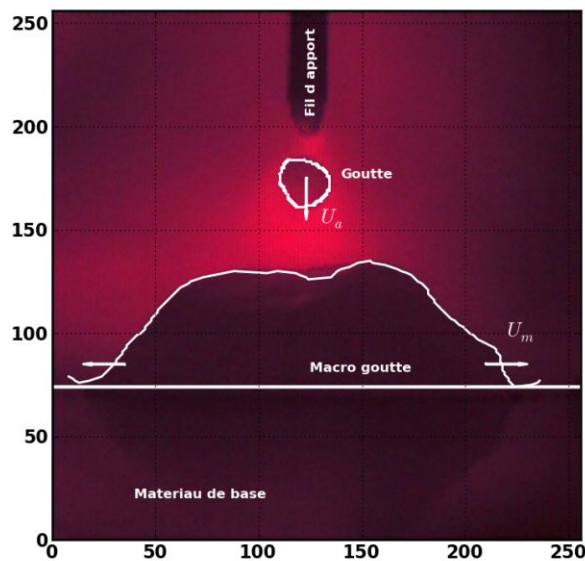


FIGURE 5.5 – Description d’une image de la macro-goutte en cours de soudage

Une pré-sélection des images est nécessaire, afin d’en alléger l’analyse dans **erCv**. Cette pré-sélection dépend du domaine à caractériser.

Bain de fusion ou macro-goutte : Une seule image est extraite à la fin de chaque temps froid de l’essai. Parce qu’à ces instants le rayonnement du plasma est moins intense, l’image du bain de fusion est alors bien contrastée. De plus, la gouttelette est déjà absorbée par la macro-goutte. Il en résulte une surface libre intégralement visible et équilibrée. La procédure de sélection des images s’exécute via les fonctions de synchronisation et d’extraction de la **BAME**. L’ensemble des images disponibles sur les signaux ”procédé” est répertorié (figure 5.6a). Le critère de

sélection ("une image fin de temps froid") est appliqué. Ainsi, les images pertinentes (figure 5.6b) sont extraites. Le nombre d'images à traiter est variable entre 200 et 700 selon les expériences (ceci est lié à la fréquence de pulsation du courant). Aussi le lien entre les images et les données de températures, d'intensité, de tension d'arc, est conservé.

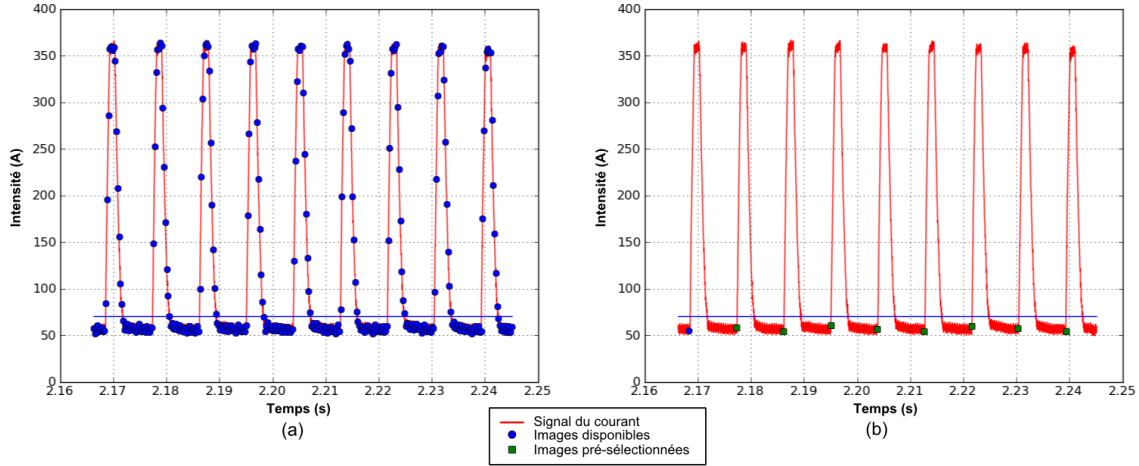


FIGURE 5.6 – Diagrammes présentant en (a) l'ensemble des images disponibles (ronds) sur le signal intensité; et en (b) les images pré-sélectionnées (carrés) sur le même signal pour le post-traitement via **erCv** de la macro-goutte

La fonction **erMacroDropAnalysis** est utilisée pour la détection du contour de la macro goutte sur l'ensemble des images pré-sélectionnées. On obtient ainsi l'évolution de la surface libre en cours de soudage (figure 5.7).

Des profils détectés automatiquement, il est encore nécessaire d'extraire les paramètres géométriques du système étudié. Les profils détectés sont filtrés (seuillage différentiel à trois critères). Les rayons et hauteurs sont quantifiés par différence des coordonnées des sommets. Les angles de mouillage apparents sont déterminés par régression linéaire au voisinage des lignes triples. Les aires et les volumes sont calculés avec des modèles géométriques de type calotte sphérique (méthode des moindres carrés). Cette procédure est validée par une comparaison des paramètres obtenus automatiquement (**erCv**) et ceux relevés manuellement à partir des mêmes images (figure 5.8).

Gouttelette en vol libre : Les images à traiter sont choisies en fonction de l'instant du détachement de la goutte (rupture du pont liquide) jusqu'à celui de son impact sur la macro-goutte. Dans le cas du mode de transfert pulsé, la goutte se détache à l'instant de la chute de courant. Elle poursuit son transfert entre l'électrode et le bain de fusion durant la première moitié du temps froid (figure 5.10). Il est donc choisi d'extraire toutes les images relatives au transfert des gouttes pour plusieurs périodes, et de façon automatique (figure 5.9). Une fois de plus, les fonctions de synchronisation et d'extraction des données acquises de la **BAME** sont utilisées. La figure 5.9 montre les images pré-sélectionnées pour le post-traitement avec **erCv**.

Une autre fonction de **erCv**, **erMetalTransfertAnalysis** est alors utilisée pour la détection du contour de la gouttelette en vol libre. Aussi, cette fonction permet d'extraire la position du centre d'inertie de la gouttelette, ainsi que les indices de forme (cylindrique ou patatoïde). Le volume de la macro-goutte est calculé en se basant sur l'hypothèse d'axisymétrie (mesures dimensionnelles 2D). Cependant, au vu du caractère très aléatoire de la variation de forme de la gouttelette, cette dernière hypothèse peut parfois s'avérer inappropriée.

Ayant à disposition les données dimensionnelles de la macro-goutte et de la gouttelette en différents instants d'évolution du système en cours de soudage, il est maintenant possible

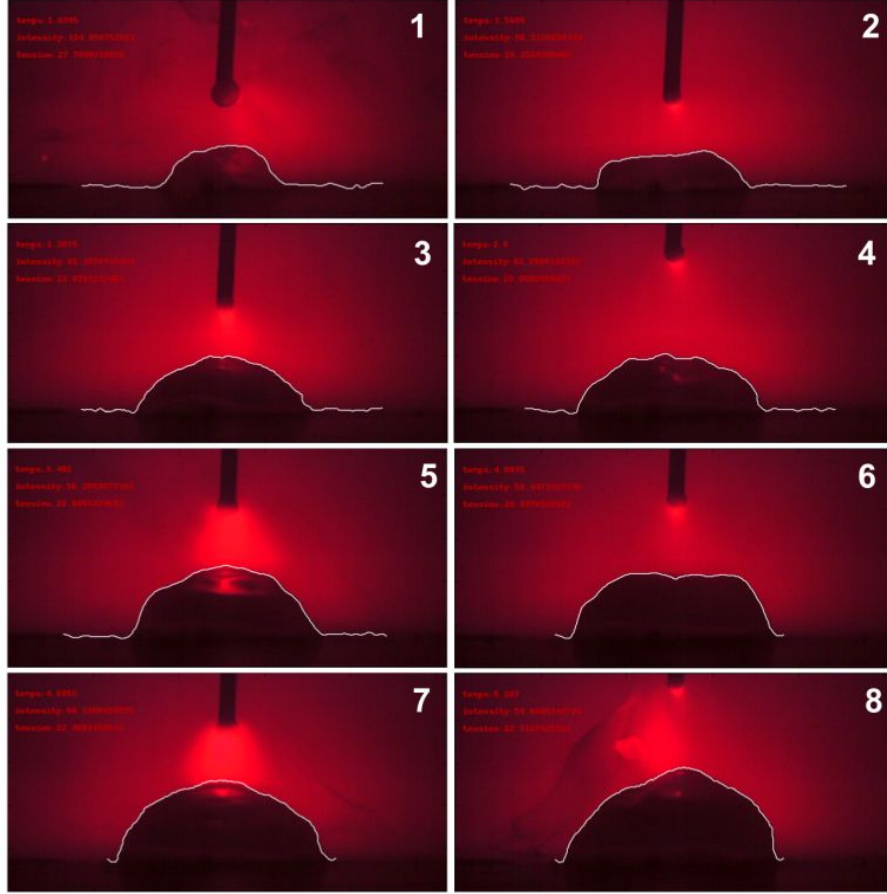


FIGURE 5.7 – Images extraites d’une séquence vidéo du système macro-goutte en cours de soudage avec les surfaces libres détectées par `erMacroDropAnalysis`

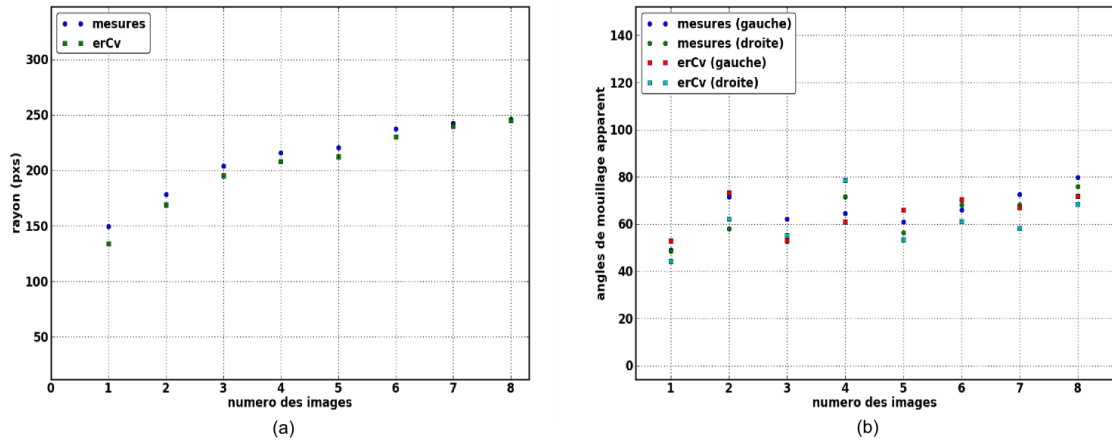


FIGURE 5.8 – Comparatif des relevés manuels et automatiques du rayon R_m (a) et des angles de mouillage θ_{ag} , θ_{ad} (b) de la macro-goutte (correspondance numéro images figure 5.7)

de connaître les vitesses de propagation de la ligne triple $U_m(t)$ puis celle d’évolution de la gouttelette durant son transfert $U_a(t)$. Cette procédure est ainsi adaptée au traitement d’un grand nombre de résultats expérimentaux.

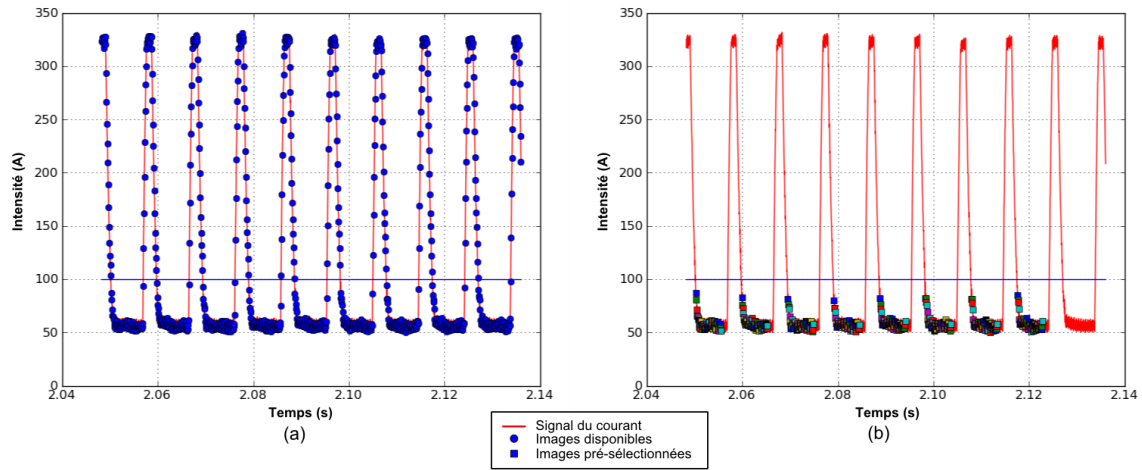


FIGURE 5.9 – Diagrammes présentant en (a) l’ensemble des images disponibles (ronds) sur le signal intensité; et en (b) les images pré-sélectionnées (carrés) sur le même signal pour le post-traitement via *erCv* de la gouttelette en vol libre

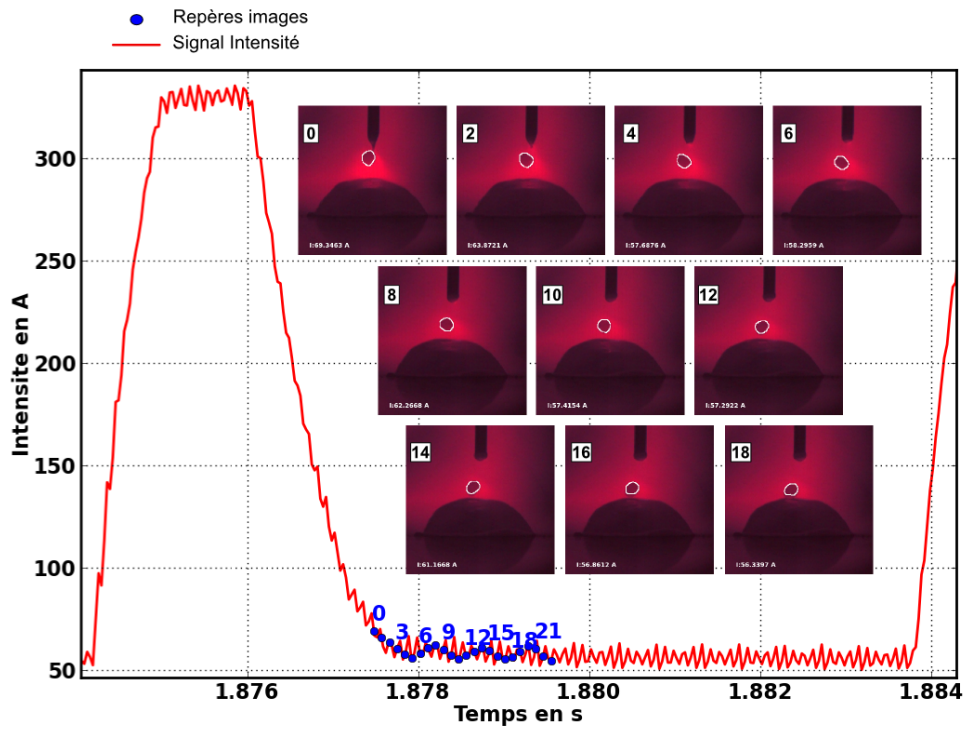


FIGURE 5.10 – Signal intensité associé aux images traitées

5.3 Résultats expérimentaux et discussions

Les résultats obtenus sont détaillés dans un premier temps sur l’essai de référence R. L’effet de la variation des paramètres décrits dans la table 5.1 est ensuite étudié.

5.3.1 Analyse de l'essai de référence (type R)

La répétabilité des essais a été éprouvée avec succès sur une série de quatre essais réalisés dans des conditions identiques. La figure 5.11 présente une vue des échantillons à l'issue des essais de soudage ainsi qu'une macrographie post-mortem de la macro-goutte. Une faible pénétration de la zone fondue (plus importante au centre) est observée. L'existence de deux angles de mouillage apparents (mesurable au cours du soudage), proches des angles réels (mesurable seulement post-mortem), conforte ainsi les hypothèses exposés à la section 5.2.1.1. Le choix de la cible (section 5.2.2.1) est validé. On peut également observer une légère dépression centrale au sommet de la macro-goutte solide qui s'explique par le phénomène de retrait axisymétrique de la matière au cours de la solidification ou d'un éventuel dégazage.

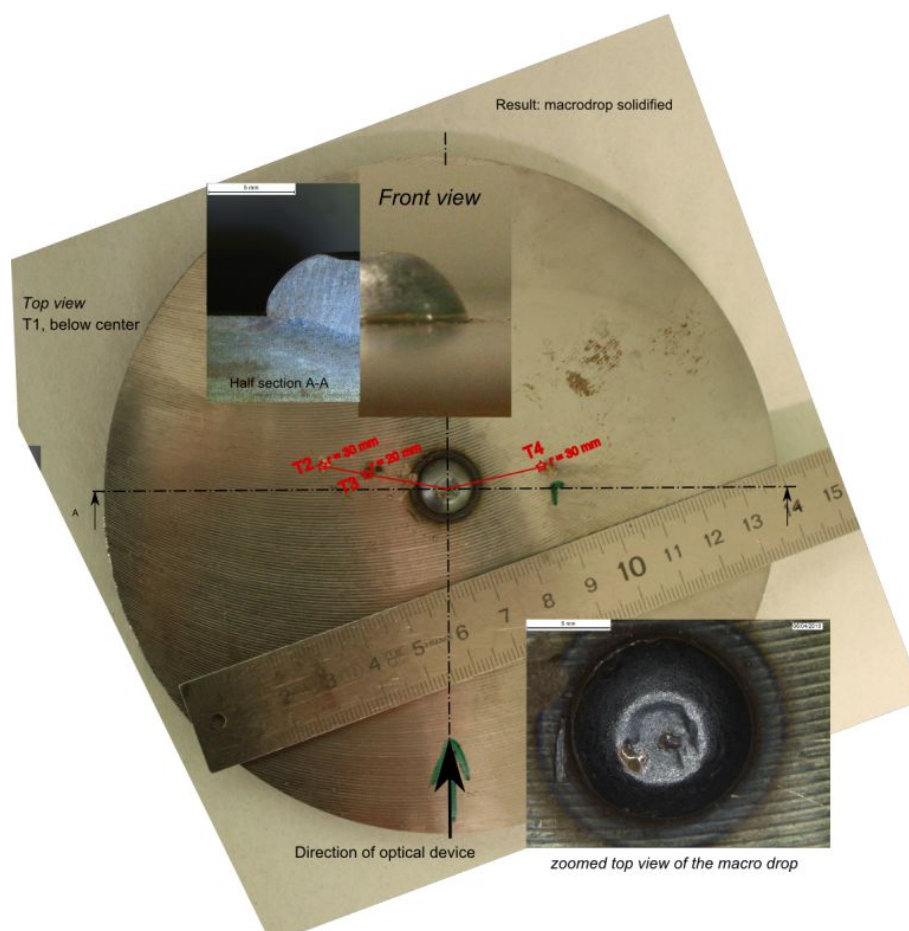


FIGURE 5.11 – Vue générale des éprouvettes après essais et détails de la macro-goutte (macrographie et vue de dessus)

Les essais sont réalisés en mode courant pulsé comme le montre la figure 5.12(a) qui correspond à la mesure des paramètres procédé en cours de soudage. Cette mesure permet de déterminer l'énergie effectivement délivrée par le poste et de contrôler la qualité de l'opération de soudage, notamment en terme de stabilité des transferts (absence de court-circuit...).

La figure 5.12(b) présente les courbes de température mesurées par les thermocouples en différents points de la cible. Les thermocouples 3 et 4, localisés a priori à la même distance du centre de la cible, montrent une différence de température de pic. Cette différence peut s'expliquer par un défaut d'axisymétrie du système mais aussi par un défaut de localisation des thermocouples (erreur de l'ordre du millimètre). Au cours de la phase de refroidissement

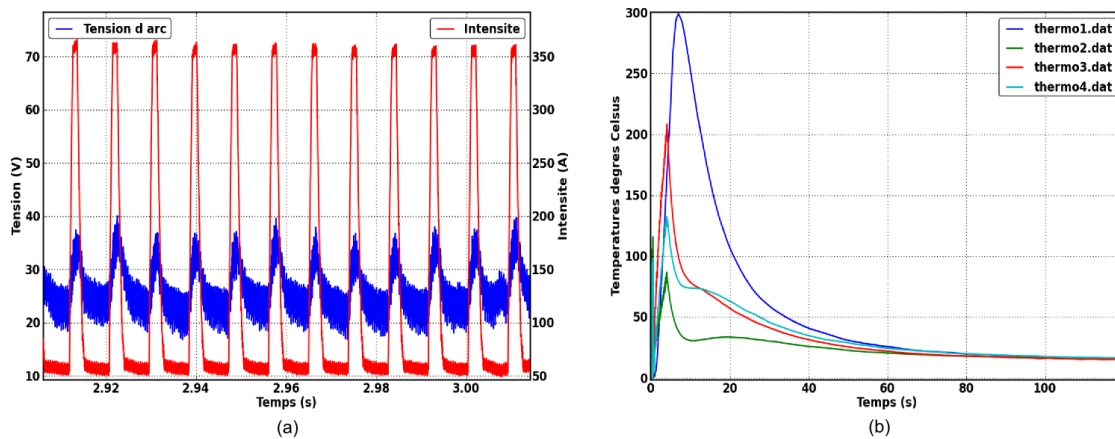


FIGURE 5.12 – Mesures expérimentales : (a) tension et intensité en cours de soudage, (b) mesures de température pendant le soudage (durée 4 s) et au cours du refroidissement

(post-soudage), l'équilibre thermique du système est atteint assez rapidement (au bout de 80 s). Le temps caractéristique de la diffusion de la chaleur est d'environ 8 s comme le montrent les courbes des thermocouples 3 et 4. Le thermocouple 1 est placé au centre de la cible en face envers. La température de pic est atteinte plus tardivement, traduisant ainsi l'effet de diffusion thermique dans l'épaisseur de la cible.

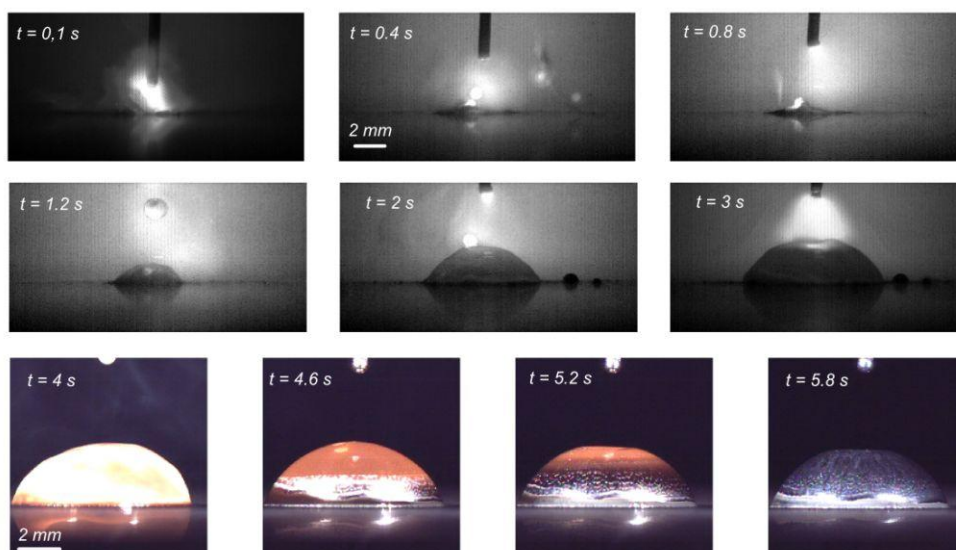


FIGURE 5.13 – Images extraites de la séquence vidéo illustrant les étapes clés de la formation de la macro-goutte

Les images issues de la caméra vidéo rapide permettent de distinguer clairement trois phases au cours des essais (figure 5.13) :

1. Une première phase d'établissement de l'arc qui se caractérise par la présence de court-circuits, de projections métalliques (comme dans le cas d'un transfert globulaire) et d'une macro-goutte très perturbée par la chute des gouttelettes de métal d'apport (ordres de grandeur similaires). Cette première phase dure approximativement 1 s à compter du début du soudage ;

2. Dans la deuxième phase, le régime de transfert en mode pulsé est bien établi et la macro-goutte se développe régulièrement jusqu'à l'extinction de l'arc (à $t = 4$ s). Les gouttelettes de métal d'apport contribuent essentiellement à l'apport de quantité de matière et de chaleur ;
3. La troisième phase correspond à la phase de solidification qui progresse depuis la ligne triple à l'interface avec la cible jusqu'au sommet de la macro-goutte.

5.3.1.1 Evolution de la Macro-goutte : comportement de la ligne triple

L'analyse dimensionnelle de la macro-goutte est observée. Les images sont traitées grâce à la bibliothèque **erCv** (section 5.2.2.4) dans le but d'obtenir l'évolution des paramètres géométriques permettant la description de la macro-goutte.

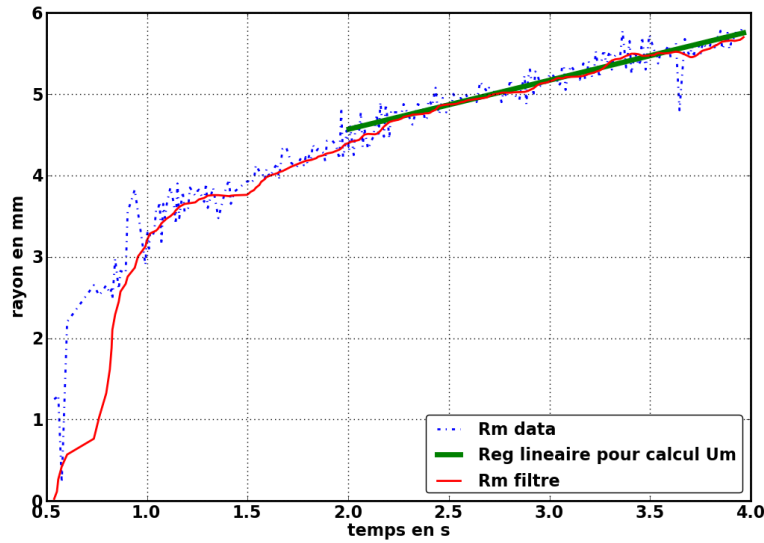


FIGURE 5.14 – Evolution du rayon de base de la macro-goutte au cours du soudage (essai type R)

La figure 5.14 présente ainsi l'évolution du rayon de base au cours de l'opération de soudage, traduisant également la cinétique de la ligne triple. Un accroissement rapide du rayon de base en début de soudage ($t < 1$ s) est observé. Il traduit une évolution rapide en surface de la cible de l'isotherme correspondant au solidus grâce à l'apport énergétique direct par l'arc électrique. La base de la macro-goutte atteint ainsi rapidement la valeur de 6 mm. Au-delà de 1 s de soudage, l'accroissement du rayon de base est moins rapide et la macro-goutte grossit régulièrement avec l'apport de matière, jusqu'à l'extinction de l'arc. Le changement de dynamique peut être également attribué à une modification de l'écoulement dans la macro-goutte, due à un effet de taille critique entre celles des gouttes et celles du bain (taille du bain de l'ordre de 2-3 mm durant la première phase de croissance du système). Hu et Tsai [67] observent aussi ce type de comportement lors de la simulation du dépôt de gouttelettes. Après l'extinction de l'arc, la base de la macro-goutte n'évolue plus et la phase de solidification peut démarrer.

La figure 5.15 présente l'évolution des angles de mouillages apparents droit et gauche au cours du temps. Les tendances d'évolution sont les mêmes pour les deux angles, en accord avec la configuration axisymétrique de l'essai. Dans ce cas aussi, on peut observer une augmentation très rapide de la valeur des angles de mouillage en début de soudage ($t < 1,5$ s). Les variations

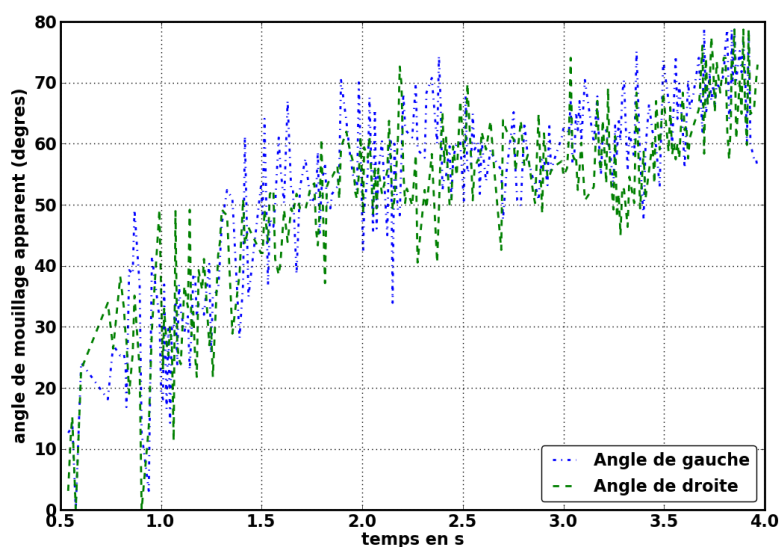


FIGURE 5.15 – Evolution des angles apparents de mouillage θ_{ag} , θ_{ad} au cours du soudage (essai type R)

des angles sont ensuite moins marqués et leurs valeurs respectives varient entre 40° et 80° . Ces variations importantes et rapides traduisent également les oscillations très dynamiques de l'interface liquide-gaz autour de la ligne de contact.

Ces résultats montrent clairement l'existence de deux phases. Une première ($t < 1$ s) correspond à la création et à la mise en place de la zone fondue sous la forme d'une macro-goutte. La deuxième phase ($t > 1$ s) correspond à la croissance régulière de la macro-goutte avec l'apport de matière.

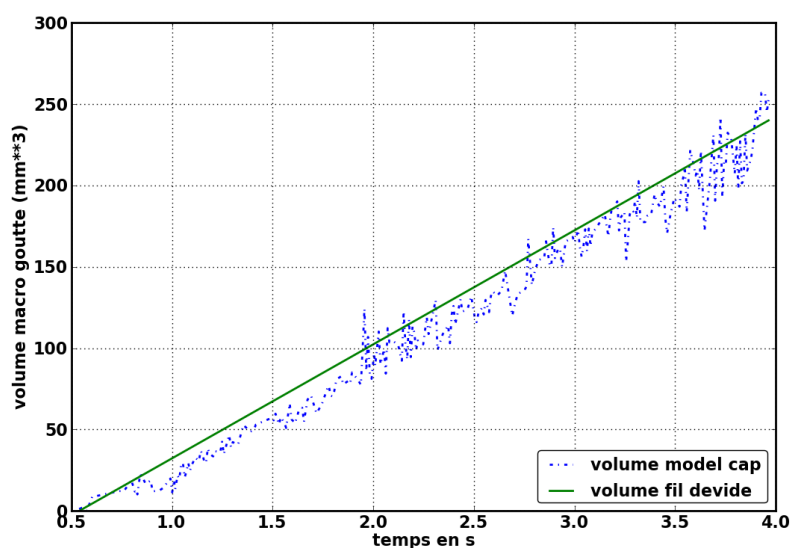


FIGURE 5.16 – Evolution des volumes de métal déposé et de la macro-goutte au cours du soudage (essai type R)

Les mesures expérimentales de la hauteur h_m et du rayon de base R_m permettent d'estimer

le volume V_m de la macro-goutte au cours du temps sur la base d'un modèle de calotte sphérique (Eq. 5.2).

$$V_{cap}(t) = \frac{\pi}{6} h_m(t) \left(\frac{3}{2} \left(\frac{R_m(t)}{2} \right)^2 + h_m^2(t) \right) \quad (5.2)$$

Le volume de la macro-goutte ($V_{cap} = V_m$) est comparé au volume déposé par le métal d'apport à l'aide de la section du fil et de la vitesse de dévidage du fil qui est de 6 m/min (Figure 5.16). Les dilatations et l'expansion à la fusion qui devraient conduire à une augmentation du volume de métal liquide sont atténuées par la présence de projections métalliques lors de l'établissement de l'arc et de la vaporisation qui peut exister au cours du soudage. Un écart en défaveur du volume de la macro-goutte est observé. Cependant, les tendances observées sont les mêmes, accréditant ainsi l'hypothèse d'un modèle de calotte sphérique pour décrire la forme de macro-goutte. Aussi, ce modèle géométrique semble montrer des effets capillaires importants, mettant en compétition entre autres, les effets de tensions superficielles et visqueux.

5.3.1.2 Alimentation de la Macro-goutte : gouttelettes en vol libre

La méthode pour l'analyse des gouttelettes (section 5.2.2.4) est appliquée à l'essai de référence (type R). On obtient ainsi le résultat présenté à la figure 5.17. Les trajectoires des différentes gouttelettes traitées sont décrites par leur centre d'inertie. L'image de fond a pour objectif de situer ces trajectoires entre l'extrémité de l'électrode et la surface libre de la macro-goutte. Ces trajectoires sont non-rectilignes et non-reproductibles dans l'intervalle de temps choisi.

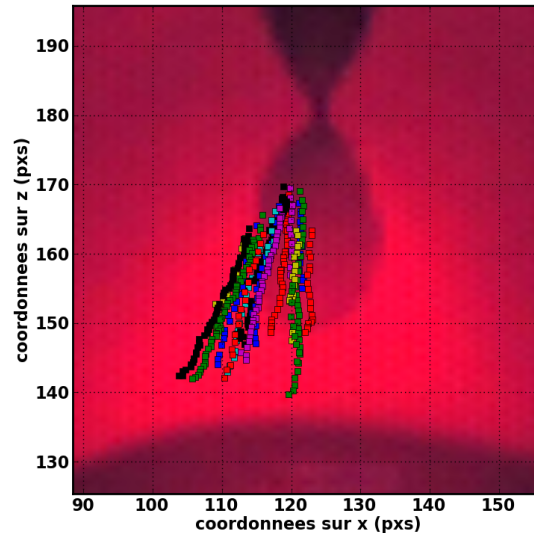


FIGURE 5.17 – Trajectoires de plusieurs gouttelettes transférées entre l'électrode et la macro-goutte

A la figure 5.18, l'observation d'une trajectoire décomposée selon l'axe porté par la base (x) et celui de révolution du système (z) montre une divergence de la gouttelette sur x et par rapport à z de l'ordre de 0,5 mm. Le calcul de ces écarts moyens sur l'ensemble de l'expérience indique une variation de $\pm 0.6 \text{ mm}$. La géométrie des gouttes pour cette configuration opératoire est quasi-sphérique. Leur rayon moyen en vol libre est de 0,5 mm (soit un diamètre de gouttelette égal au diamètre du métal d'apport). La zone d'interface entre les gouttes et la surface libre peut-être alors représentée par un disque de rayon égal à 1,1 mm. Aussi, l'évolution de la trajectoire suivant

z est quasi-linéaire, mis à part à l'instant du détachement de la goutte, après lequel un palier est observé. Ce palier correspond à une immobilisation de la goutte durant approximativement 0,5 ms, qui semble traduire l'effet de l'attraction électrostatique entre l'électrode et la goutte. Ensuite, l'inertie reprend le dessus et la goutte chute vers le bain de fusion à une vitesse quasi-constante. Le bilan des forces semble alors être quasi-nul. La vitesse moyenne de transfert des gouttelettes en vol libre (U_a), calculée à partir de ces trajectoires, est de l'ordre de $0,5 m.s^{-1}$. Les résultats de modèles numériques [67] pour des conditions opératoires proches (hormis le diamètre du fil 1.6 mm (numérique) pour 1.0 mm (expérimental)) conforte l'ordre de grandeur mesuré ($0,7 m.s^{-1}$ pour le numérique).

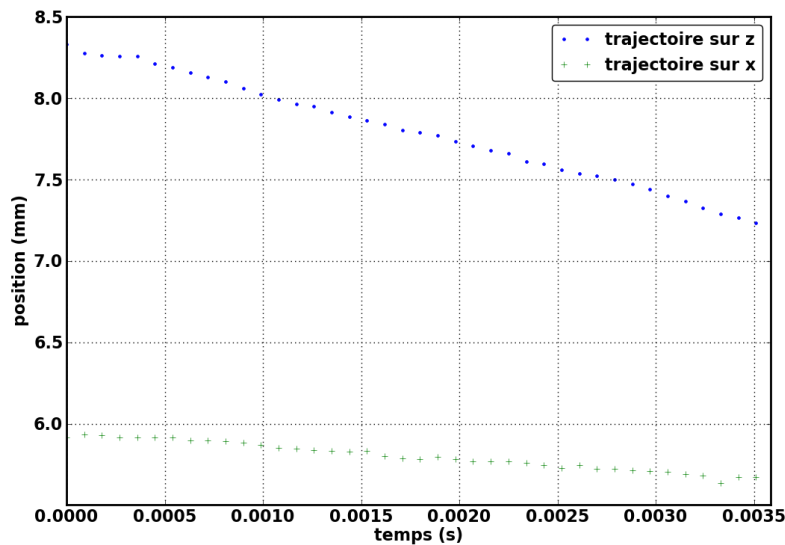


FIGURE 5.18 – Trajectoire décomposée sur les axes x et y pour une gouttelette transférée

La nature du régime des écoulements au sein de la macro-goutte et sous l'impact des gouttelettes peut être estimé avec la vitesse moyenne mesurée de la gouttelette en vol libre [59]. Avec $U_a = 0.5 m.s^{-1}$ (résultat qui est proche des vitesses fluides calculées par Lim et al [59] $u = 0.3 m.s^{-1}$ pour des conditions opératoires simulées proches) et $R_m = 5.8 mm$, le nombre de Reynolds (Eq.5.3) calculé est supérieur à 4000. Le régime semble donc être de type turbulent dans la colonne d'impact des gouttelettes de la macro-goutte.

$$Re = \frac{\rho U_a R_m}{\mu} \quad (5.3)$$

De plus, l'observation de la position de la surface libre après absorption d'une goutte en vol libre (phase régime établi), ne semble pas indiquer un effet majeur de la quantité de mouvement apportée.

Ces résultats observés à partir de l'étude du transfert métallique illustrent les trois objectifs de l'approche développée. Ils peuvent être utilisés pour l'enrichissement de la simulation (U_a , géométrie goutte, zone d'interface), les trajectoires présentées à la figure 5.17 comme un moyen de contrôle de la qualité du transfert métallique pulsé et enfin l'étude des temps (t_{palier} après détachement de la goutte) et longueurs (taille de la goutte) caractéristiques pour la compréhension et l'étude de sensibilité du transfert aux paramètres procédé.

5.3.1.3 Solidification de la Macro-goutte

La phase de solidification est présentée à la figure 5.19. Les images sont issues d'une séquence vidéo acquise avec la caméra rapide sans dispositif optique particulier (Fréquence d'acquisition = 1000 fps). La première image à $t = 0\text{ s}$ montre l'état de la macro-goutte à l'extinction de l'arc électrique. Elle est intégralement fondue. Elle oscille. Des particules circulent en surface, et laissent apparaître quelques mouvements de fluide (du sommet vers les bords ; observations à partir de la séquence vidéo). Les premiers changements de phases s'effectuent à la base du bain de fusion puis se poursuivent vers le sommet.



FIGURE 5.19 – Images extraites de la séquence vidéo illustrant la phase de solidification

Les images acquises lors de la phase de solidification sont traitées numériquement afin de détecter automatiquement l'évolution de la zone liquide du système. Un aperçu de cette détection délimitée par un contour rouge est présenté pour quelques images à la figure 5.19. Ainsi, il est possible d'extraire la position du front de solidification horizontale au cours du temps (figure 5.20, '+' bleu). Le temps caractéristique de "sur-fusion", $t_{sur-fusion}$ est de 0,25 s. Il correspond au temps de refroidissement du métal liquide jusqu'à la température de changement de phase. Le temps de solidification est $t_{solidification} = 1,6\text{ s}$. La vitesse du front apparent est quasi-constante ($2,2\text{ mm.s}^{-1}$). Cependant, en fin de solidification, le retrait de matière (phénomène de

dégazage) atténue l'évolution du front. Des résultats numériques [148; 67] montrent des temps de solidification pour une macro goutte de taille quasi-similaire de l'ordre de 1.4 s.

Aussi, le temps caractéristique de sur-fusion $t_{sur-fusion}$ est intéressant pour estimer la température du métal liquide. Gao et Sonin [152] utilise la relation 5.4 uniquement valable en conduction et jusqu'à l'initiation de la solidification.

$$t_{sur-fusion} = \frac{2R_m^2}{3a} \ln \left(\frac{T_m - T_s}{T_f - T_s} \right) \quad (5.4)$$

Avec :

- R_m : rayon de la macro-goutte ;
- $a = k/\rho/C$: diffusivité thermique
- T_m : température moyenne du bain de fusion à l'extinction de l'arc électrique ;
- T_f : température de fusion du S235 ;
- T_s : température de la cible.

L'application de la relation (5.4) au système macro-goutte indique une température moyenne du métal en fusion T_m de l'ordre de 1900 K. Ce résultat est en adéquation avec ceux obtenus numériquement par Hu et al [67] qui trouvent une température moyenne du bain de fusion à l'extinction de l'arc électrique de l'ordre de 2000 K.

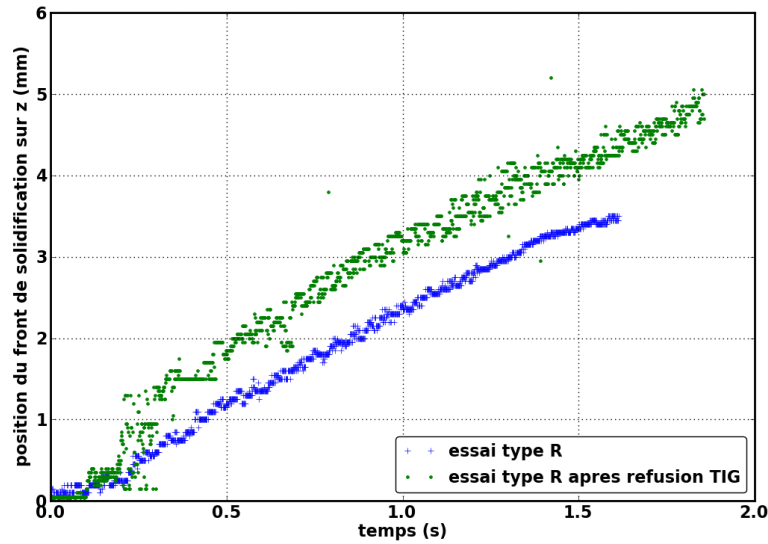


FIGURE 5.20 – Courbes décrivant l'évolution du front de solidification (essai R).

Une expérience de refusion de la macro-goutte de référence avec le procédé TIG a été menée. L'objectif est d'étudier le comportement de ce même volume de métal sans apport de matière et seulement soumis à l'effet d'un arc électrique stable (pression d'arc constante). Le choix des paramètres procédé pour cet essai a été réalisé en terme d'énergie équivalente délivrée par la source TIG à celle de la source MIG-MAG pour la construction de la macro-goutte initiale. Le procédé TIG est utilisé en courant continu, polarité directe avec pour gaz de protection 100% d'argon. Alors qu'en soudage MIG-MAG, la polarité inverse est utilisée avec un mélange gazeux de 8% CO_2 + 92% Ar . La physico-chimie à l'interface arc-bain est donc différente. A la figure 5.21, les géométries de la macro-goutte de référence avant et après refusion sont comparées à l'état liquide puis solidifiées (Vue de face et de dessus). Il est intéressant d'observer l'expansion de la matière liquide vis-à-vis de celle solide entre les images (b) et (a) puis (d) et (c). La macro-goutte de l'image (a) a des angles de mouillages plus petits que celle refusionnée (c). Cette différence de mouillabilité peut s'expliquer par une variation des tensions superficielles. Dans le cas du

soudage TIG la composition du gaz de protection a pour effet de les augmenter. Le volume de métal équivalent et la différence de mouillabilité pour les deux essais, se traduisent aussi par une macro-goutte liquide à l'équilibre avec une hauteur variable. La morphologie différente du retrait de solidification observée pour la macro-goutte refusionnée, peut s'expliquer par des mouvements de convection inversés dûs au changement de polarité, et à l'absence d'inclusion gazeuse induite dans le cas du soudage MIG-MAG par l'apport de matière. Cette inversion des courants entre les deux expériences, a pu être observée par le suivi de particules sur la surface de la macro-goutte lors de sa solidification. Aussi, l'estimation de leur vitesse moyenne est de l'ordre de 0.15 m.s^{-1} .

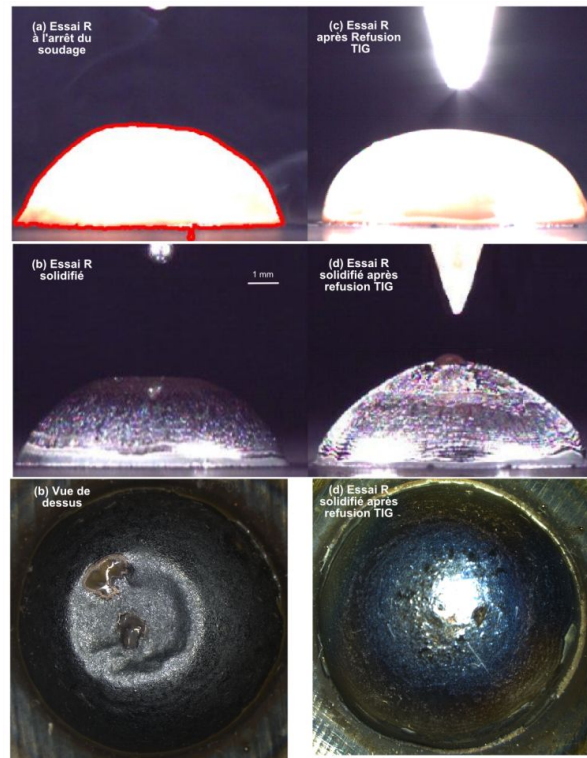


FIGURE 5.21 – (a) macro-goutte liquide, puis solidifiée (b) de l'essai de référence. (c) macro-goutte après refusion en GTAW puis (d) re-solidifiée

L'évolution du front de solidification de la macro-goutte refusionnée est tracé à la figure 5.20 (points verts). Le temps de sur-fusion est quasi-équivalent à celui de référence. Aussi, l'évolution du front de solidification apparent évolue à la même vitesse. Cependant, le temps de solidification est légèrement plus important dans le cas de la refusion TIG (1.8 s). Les hauteurs différentes des macro-gouttes semblent en être une des explications. Enfin la caractérisation de cette phase de solidification par un accès extérieur (caméra) en est certainement une autre.

5.3.2 Analyse de sensibilité aux paramètres procédé

Les influences de chacun des paramètres sur le comportement de la macro-goutte sont étudiés sur la base des résultats de la campagne d'essais présentée à la section 5.2.2.2.

5.3.2.1 Essais avec variation du temps de soudage (type S)

Les essais avec variation du temps de soudage montrent tous l'existence des deux phases de comportement bien distinctes de la macro-goutte : la première correspondant à la mise en place très rapide de la macro-goutte, puis une deuxième pour laquelle l'évolution est plus progressive. Au delà de 4 secondes de soudage jusqu'aux 8 secondes (temps de soudage le plus long mis

en œuvre) la base de la macro-goutte continue de croître linéairement sans faire apparaître de nouveaux paliers. Durant la première phase les trois courbes se superposent particulièrement bien ce qui démontre encore une fois la bonne répétabilité des résultats (figure 5.22).

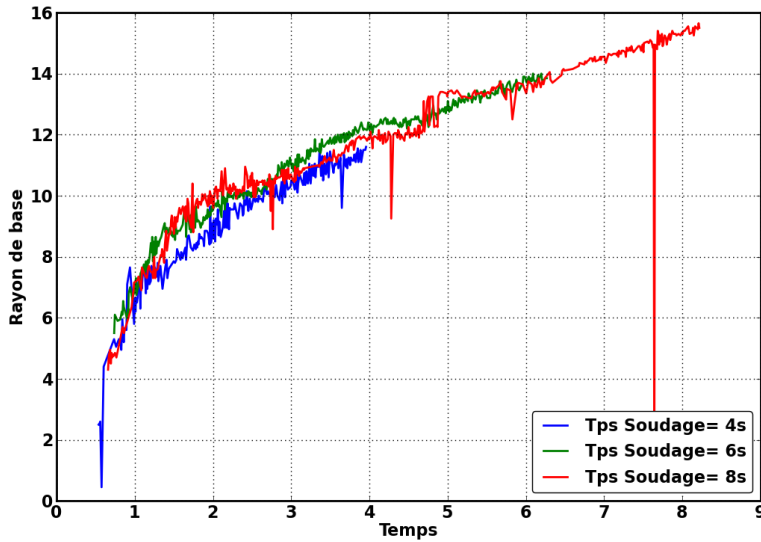


FIGURE 5.22 – Evolution du rayon de la macro-goutte en cours de soudage (essai type S)

5.3.2.2 Essais avec variation de la vitesse fil (type V)

L'augmentation de la vitesse fil fait croître le volume et l'énergie déposés. Les essais montrent que la hauteur de la macro-goutte a tendance à diminuer pour une même valeur du rayon de base lorsque la vitesse de fil augmente (figure 5.23(a)). Les volumes V_m des macro-gouttes calculés avec un modèle géométrique de calotte sphérique (alimenté par R_m et h_m , section 5.3.1.1) sont présentés à la figure 5.23(b) en fonction des volumes de métal dévidé ($V_{fil} \times \text{temps}$). L'écart relatif entre ces volumes augmente avec la vitesse fil. Le modèle géométrique choisi ne semble pas être toujours parfaitement bien adapté suivant l'énergie et le volume de matière apportés au système étudié. Ce constat montre que, pour les énergies délivrées plus importantes, les effets capillaires sont en compétition avec les effets thermoconvectifs qui peuvent prendre le dessus. Géométriquement, ces effets se manifestent par des angles de mouillages plus petits lorsque la vitesse fil augmente.

En augmentant la vitesse de fil, l'énergie de soudage et l'énergie amenée à la cible sont aussi augmentées (Figure 5.24(b)). Indépendamment de la vitesse fil, pour un même volume de métal apporté, l'énergie délivrée par la source est identique. Il est également intéressant de remarquer que, toujours pour un même volume de métal apporté, les bases mesurées pour les quatre essais sont quasiment identiques à $\pm 1 \text{ mm}$ (Figure 5.24(a)). Ce résultat tend à démontrer un rapport de proportionnalité entre le paramètre V_{fil} et le rayon R_m de la macro-goutte obtenue.

La figure 5.25 montre l'évolution de la vitesse de déplacement U_m de la ligne triple en fonction des vitesses fil utilisées. Cette évolution est quasi-linéaire. Ce résultat illustre la relation $U_m = k \times V_{fil}$. Cette analyse dimensionnelle de la phase soudage montre aussi que les macro-gouttes réalisées avec des énergies élevées, et donc des volumes importants, sont plus étalées, moins hautes et avec des angles de mouillage plus petits, démontrant l'influence des facteurs énergétiques sur la croissance de la macro-goutte.

La section 5.3.1.3 présentait la phase de solidification de l'essai de référence. La figure 5.26 montre un comparatif entre le résultat obtenu pour l'évolution du front de solidification de l'essai

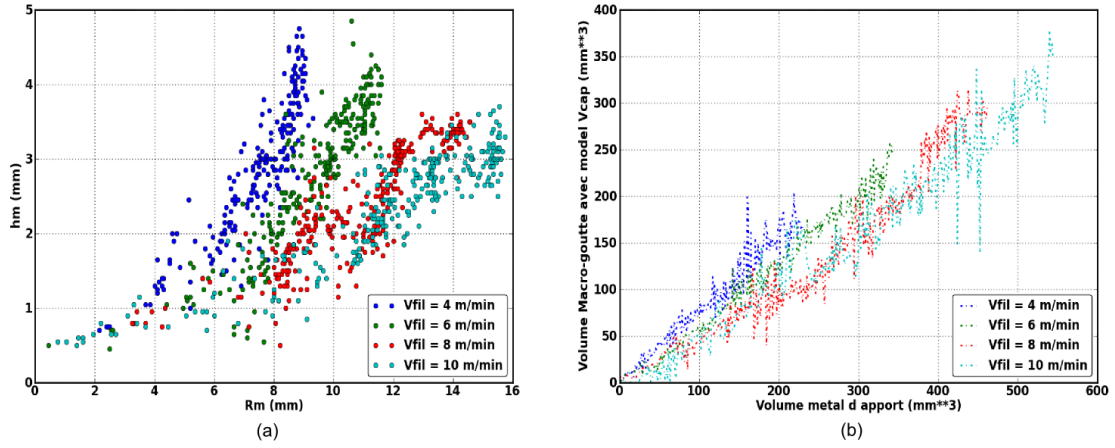


FIGURE 5.23 – Essais de type V : (a) évolution de la hauteur de la macro-goutte en fonction de la base, (b) évolution du volume de la macro-goutte en fonction du volume de métal d’apport dévidé

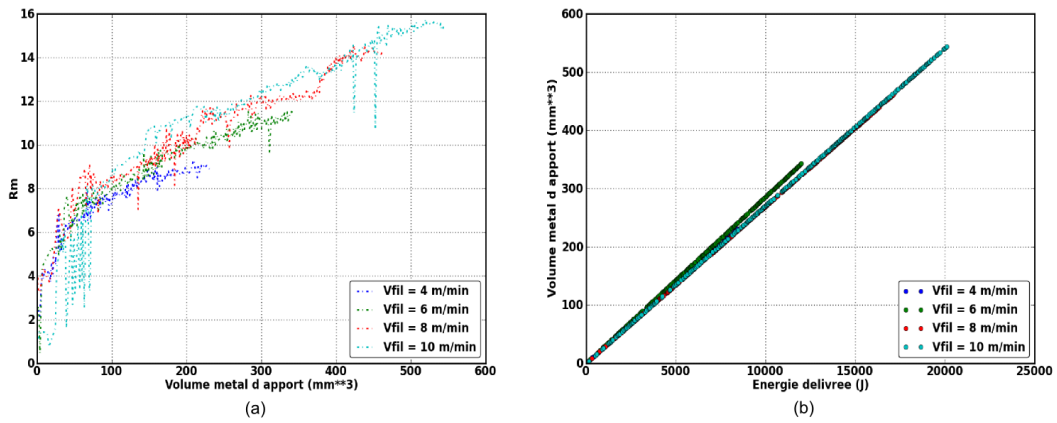


FIGURE 5.24 – Essais de type V : (a) évolution de rayon de la macro-goutte en fonction du volume de métal d’apport, (b) évolution du volume de métal d’apport en fonction de l’énergie délivrée par la source

$R(V_{fil} = 6 \text{ m.min}^{-1})$ puis celui d’un essai V ($V_{fil} = 10 \text{ m.min}^{-1}$). Le temps caractéristique de solidification pour $V_{fil} = 10 \text{ m.min}^{-1}$ est logiquement plus conséquent. Le rapports des temps caractéristiques ($t_{solidification}^6 / t_{solidification}^{10}$) est égal à celui des vitesses fil.

5.3.2.3 Essais avec variation de la fréquence (type F)

Les essais avec variation de fréquence (pour les gouttelettes et le courant) ne montrent pas d’influence de la fréquence sur le comportement global de la macro-goutte, la géométrie finale étant inchangée (figure 5.27). Les courbes d’évolution du rayon R_m et de la hauteur h_m de la macro-goutte pour une fréquence de pulsation de 40 Hz sont bruitées. La visualisation des images de cette expérience montre un bain de fusion particulièrement oscillant. La macro-goutte semble osciller sous l’influence du régime pulsé du courant pilote du procédé, et évolue donc à la même fréquence. Nous avons certainement pour cette configuration atteint une fréquence propre du système.

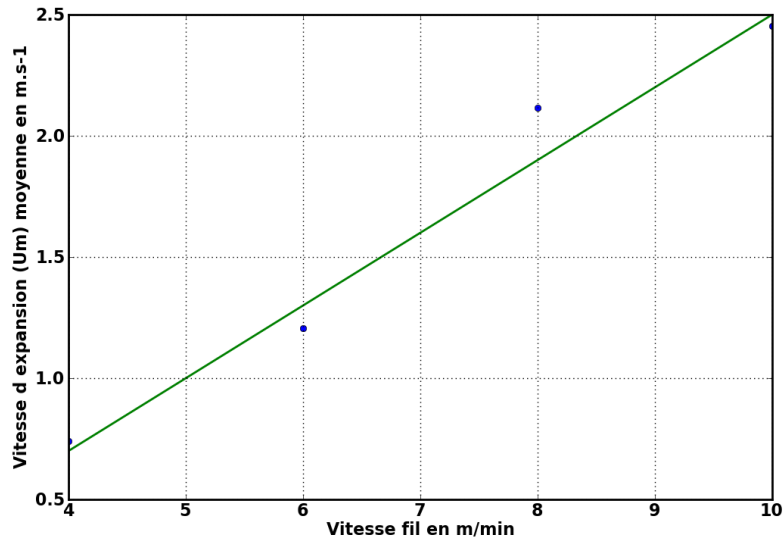


FIGURE 5.25 – Essais de type V : évolution de U_m en fonction du paramètre procédé V_{fil}

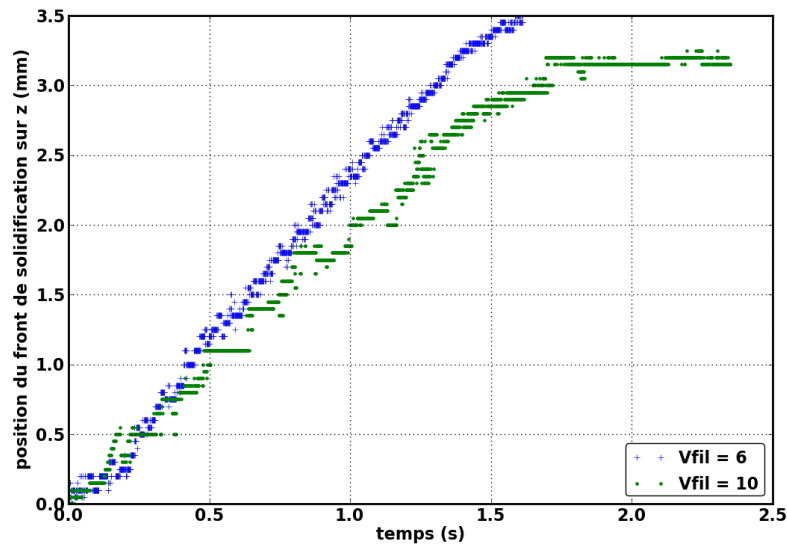


FIGURE 5.26 – Courbes décrivant l'évolution du front de solidification (essais de type V).

La figure 5.28 présente un détail de l'évolution de la hauteur de la macro-goutte mise en relation avec l'évolution de la tension au cours du soudage. Les résultats montrent une évolution globale croissante de la hauteur de la macro-goutte, mais cette évolution n'est pas monotone. En effet, on peut constater une oscillation périodique de la hauteur de la macro-goutte avec une fréquence similaire à celle du procédé (environ 40 Hz dans cet essai), mais avec une opposition de phase. Ces mesures traduisent le fait que la tension est l'image de la hauteur d'arc, mais aussi que la pression d'arc, qui augmente avec l'énergie délivrée (tension et intensité en phase), conditionne le comportement global de la macro-goutte.

Ce résultat est également intéressant afin d'estimer quelques temps caractéristiques. L'analyse du signal intensité (paramètre pilote du procédé) synchronisé avec les hauteurs h_m mesurées donne accès au temps de réponse du système lorsque le temps chaud est appliqué. Cet effet se traduit par un enfoncement de la surface libre du bain de fusion. L'ordre de grandeur pour

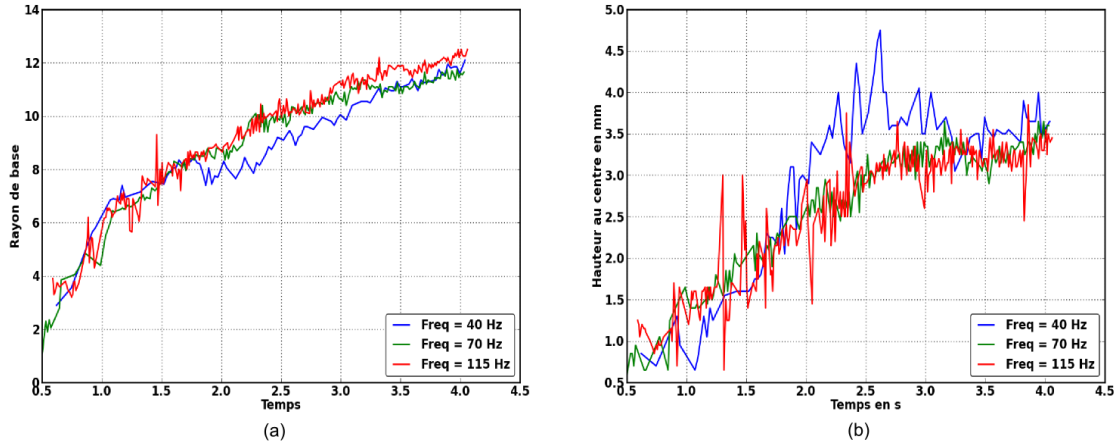


FIGURE 5.27 – Variation de la fréquence des gouttelettes : (a) évolution du rayon de base R_m et (b) de la hauteur h_m en fonction du temps de soudage (essais type F)

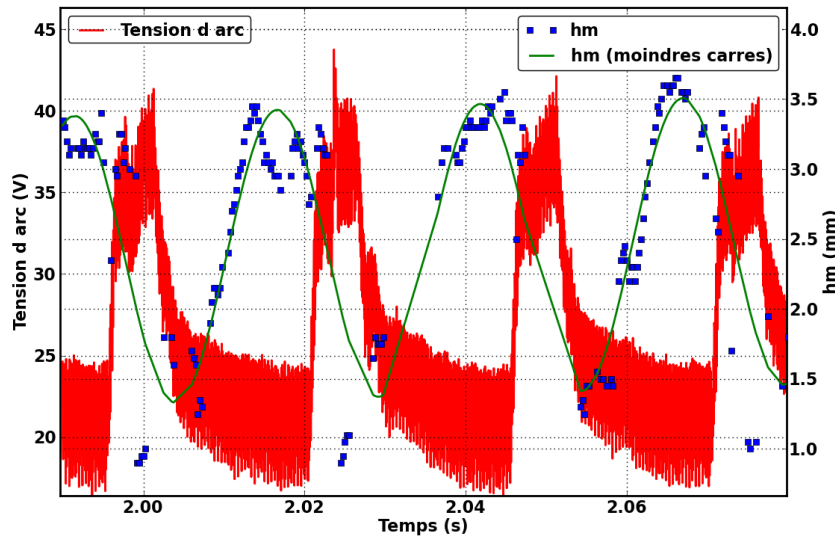


FIGURE 5.28 – Évolution comparée de la hauteur de la macro-goutte et de la tension de soudage au cours de l'essai (essais type F)

une fréquence de pulsation de 40 Hz est $t_{depression} = 3\text{ ms}$. Aussi, le temps de réponse du système après relâchement du courant (temps froid) qui se traduit par le retour à l'équilibre de la surface libre, est estimé $t_{relachement} = 10\text{ ms}$. Enfin, des oscillations (variation de h_m) propres du système ont été observées au cours du temps froid autour de la position d'équilibre de la macro-goutte. L'ordre de grandeur de leur fréquence d'oscillations est 200 Hz. Une observation à la surface du bain de fusion laisse apparaître des ondelettes de courtes longueurs d'ondes. Ces ondelettes sont convectées par le fluide et semblent démontrer un équilibre entre les tensions superficielles et la gravité.

5.3.2.4 Essais avec variation de la température initiale du substrat (type T)

La figure 5.29 montre l'évolution des angles de mouillage apparents au cours du soudage pour différentes températures initiales de la cible métallique (respectivement 20°C , 300°C et 600°C).

Les résultats de mesure montrent que le préchauffage a tendance à améliorer le mouillage par l'apparition de valeurs d'angles de mouillage relativement faibles. L'effet est en particulier notable pour l'essai avec préchauffage à 300°C (comparativement à celui à température ambiante). Cet effet est par contre moins marqué lorsqu'on compare le préchauffage à 300°C et celui à 600°C . Ces essais mettent en évidence l'influence des phénomènes de fusion au niveau de la ligne triple en fonction d'un paramètre énergétique.

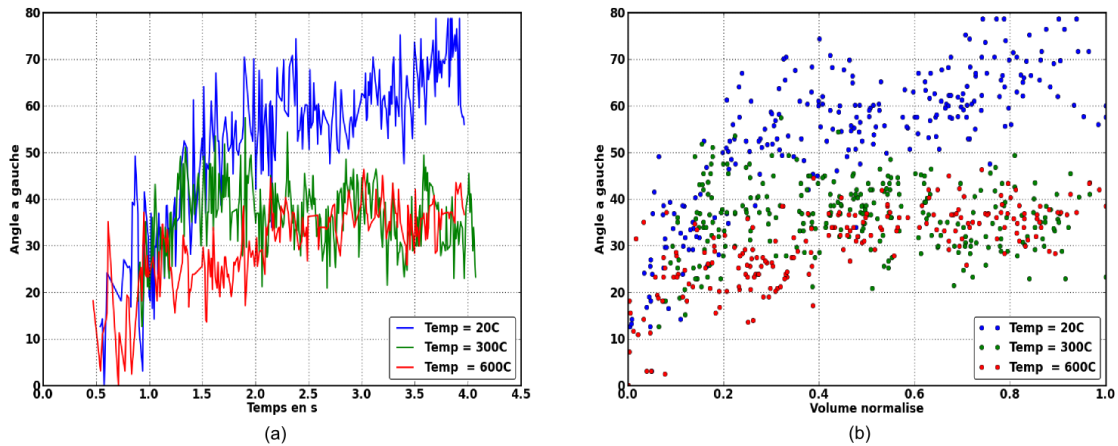


FIGURE 5.29 – Evolution des angles de mouillage apparents pour différentes températures initiales de la cible métallique : (a) en fonction du temps et (b) du volume normalisé (essais de type T)

5.3.2.5 Essais avec variation du gaz de protection (type G)

Dans ces essais, le pourcentage de CO_2 est augmenté graduellement pour passer d'un gaz de protection 100% argon à un mélange final de 30% de CO_2 et 70% d'argon.

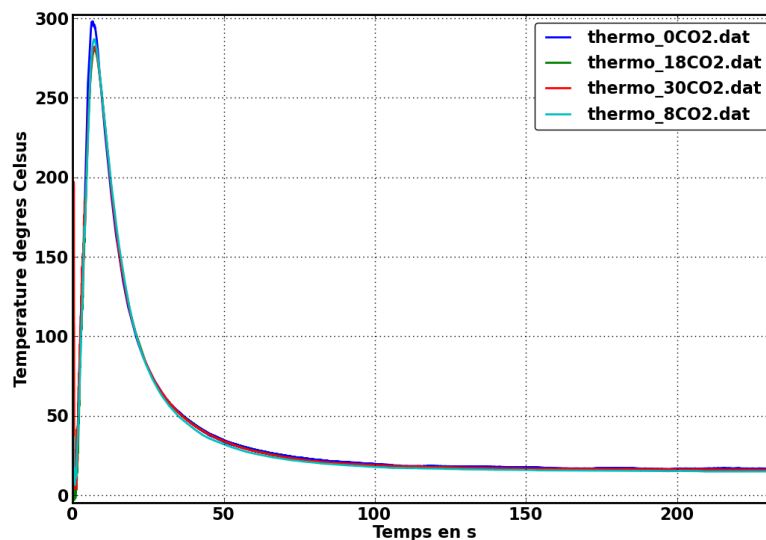


FIGURE 5.30 – Comparatif des signaux de température du thermocouple centré en face envers (T1 à la figure 5.11)

La modification du gaz jouera un rôle important sur les tensions superficielles. Elle agira sur l'équilibre interfacial gaz - liquide (par une meilleur dilution ou non). Les gaz actifs ont aussi pour effet d'agir sur la physico-chimie de l'arc. Ils diminuent le potentiel d'ionisation, donc la tension d'arc (hauteur d'arc). Cependant, l'objectif des essais de type G n'est pas d'étudier l'effet de la composition gazeuse sur l'énergie à la source. Les essais ont été réalisés pour une énergie délivrée et une fréquence de pulsation du courant constantes en agissant seulement sur les temps chauds (T_{pulse}). La figure 5.30 montre un comportement thermique de la cible identique quel que soit le gaz de protection employé. Ce résultat démontre l'effet purement physico-chimique du CO_2 sur les tensions superficielles de la surface libre et de la gouttelette en vol libre.

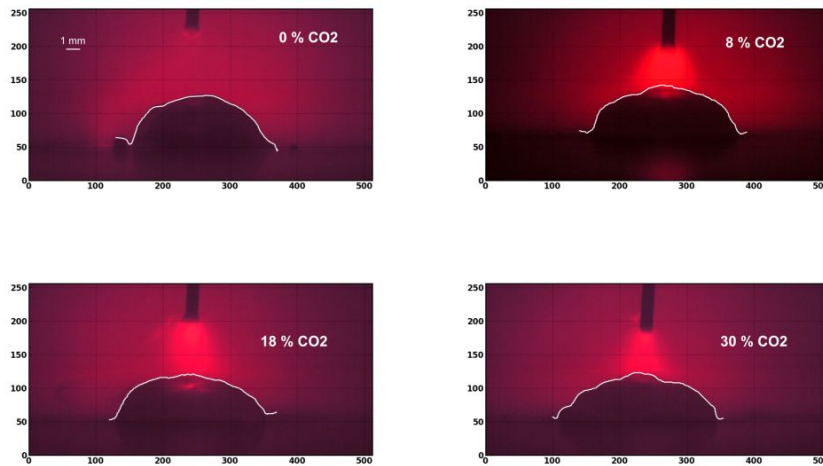


FIGURE 5.31 – Images extraites à $t_{soudage} \approx 2.5s$ au cours d'un temps froid pour les essais de type G

La figure 5.31 présente quatre images extraites des séquences vidéos pour les différents taux de CO_2 dans le gaz de protection et à des temps de soudage équivalents ($t_{soudage} \approx 2.5s$). Le mouillage du bain de fusion s'améliore pour des taux de CO_2 croissants. Ce résultat semble indiquer un effet incontestable des gaz actifs sur les tensions superficielles. Plus le pourcentage de CO_2 dans le mélange binaire est important, plus les tensions de surface diminuent. Ces effets se traduisent également par la forme des gouttelettes en vol libre. La gouttelette sous argon est proche d'une sphère, alors que celle sous 30% de CO_2 , 70% d'argon, est beaucoup moins régulière (patatoïde).

La figure 5.32(a) montre l'évolution des rayons de base R_m en fonction du temps. Les tendances sont proches. Cependant, l'essai 100% argon se distingue par l'apparition de paliers. Ils traduisent des arrêts nets de la ligne triple. Ce comportement est validé par l'analyse de la séquence vidéo. L'angle de mouillage augmente considérablement jusqu'à atteindre un seuil limite au-delà duquel la ligne décroche. Ces décrochages se manifestent de manière asymétrique.

La figure 5.32(b) présente l'évolution de la hauteur de la macro-goutte en fonction du temps pour les quatre configurations gaz. On remarque l'essai 100% argon qui se différencie des autres par une évolution rapide dès l'établissement du système. Alors que les autres essais ont pour résultats une évolution proche et quasi-linéaire de la hauteur h_m . Il faut noter que le traitement des images pour l'essai avec 30% de CO_2 est perturbé par une projection adhérente dans le champ de vision de la caméra. Pour cette raison, les paramètres géométriques extraits entre les temps de 1,4 s à 1,8 s sont incorrects.

La figure 5.33 montre que la cinétique de la ligne triple est sensiblement la même quelle que soit la composition du gaz. Dans le cas du gaz 100% argon, les angles de mouillage apparents

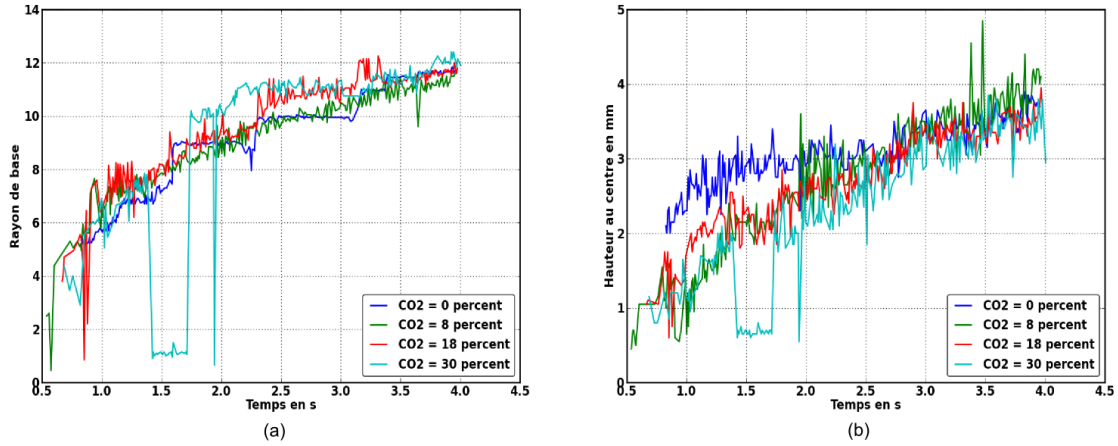


FIGURE 5.32 – Essais de type G : évolution du rayon de base (a) et de la hauteur (b) de la macro-goutte en fonction du temps pour plusieurs taux de CO_2

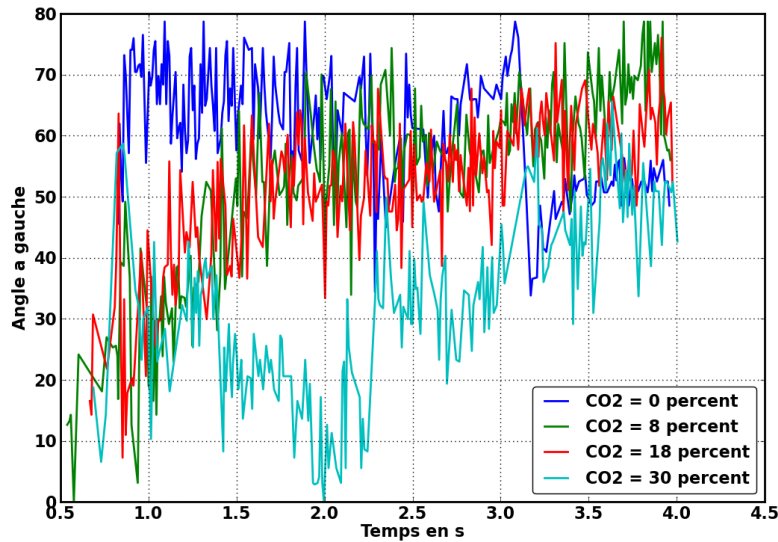


FIGURE 5.33 – Evolution des angles de mouillage de la macro-goutte en fonction du temps pour plusieurs taux de CO_2

peuvent atteindre des valeurs proches de 90° . L'augmentation de la fraction massique de CO_2 a pour effet d'améliorer le mouillage du bain et donc de diminuer les angles de mouillage apparents de la macro-goutte (cf. figure 5.33). Par contre cette augmentation de CO_2 peut générer des instabilités dans le transfert des gouttelettes de métal d'apport.

5.3.2.6 Discussions : analyse dimensionnelle

Le tableau 5.2 présente un comparatif entre les différentes expériences vis-à-vis de l'essai de référence. La durée du tir de l'arc électrique sur la cible n'a pas d'incidence sur le comportement du bain de fusion, ni sur le transfert métallique. La fréquence de pulsation n'influe pas sur le comportement de la macro-goutte. Ce résultat indique un effet négligeable de la variation de la taille des gouttelettes sur la quantité de mouvement apportée par ces mêmes gouttelettes au bain. Les oscillations de la surface libre semblent être sensibles à la variation de la pression de

TABLE 5.2 – Synthèse qualitative sur l’effet de l’augmentation des paramètres opératoires sur les quantités dimensionnelles du système étudié (relativement à l’essai de référence).

<i>Code test</i>	R_m	h_m	θ_a	U_m	E_{source}	$Aire_a$	U_a
<i>S</i>	↗	↗	→	↗	→	→	→
<i>V</i>	↗	↘	↘	↗	↗	→	↗
<i>F</i>	→	→	→	→	→	↘	↗
<i>T</i>	↗	↘	↘	→	→	→	→
<i>G</i>	↗	↘	↘	→	→	↗	→

l’arc (essai type F = 40 Hz). L’augmentation de la vitesse fil V_{fil} a pour conséquences de délivrer plus d’énergie et de matière sur le bain de fusion. L’analyse dimensionnelle des essais de type V a montré une relation linéaire entre la vitesse de la ligne triple U_m et la vitesse fil V_{fil} . Enfin, les expériences mettant en œuvre une énergie plus importante en amont (type T) et un arc plus riche en CO_2 (type G), démontrent l’effet de différents gradients thermiques et physico-chimies du plasma sur le mouillage de la macro-goutte, en agissant sur les tensions superficielles.

Les différents résultats obtenus dans ces campagnes d’essais permettent de valider les hypothèses d’axisymétrie du système et la configuration en calotte sphérique de la macro-goutte. Deux phases distinctes peuvent se dégager au cours de l’opération de soudage quelle que soit la configuration des essais. La première phase correspond à une phase d’établissement de l’arc électrique, d’initiation des transferts métalliques qui peuvent être quelque peu perturbés et de la création de la macro-goutte, jusqu’à l’obtention d’une forme de calotte sphérique. Cette première phase n’excède que rarement une durée de une seconde à partir de l’allumage de l’arc. La deuxième phase correspond à une augmentation progressive et régulière de la macro-goutte avec le dépôt de métal, jusqu’à l’extinction de l’arc. Cette phase peut être assimilée à une phase de régime établi. Le calcul de la longueur capillaire (Eq.5.5) pour nos caractéristiques matériaux est de $l_c = 4,86\text{ mm}$.

$$l_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \quad (5.5)$$

En considérant les valeurs obtenues du rayon de la macro-goutte et celle de la longueur capillaire, il semblerait qu’on se rapproche d’un régime de type capillaire [151; 153].

La progression rapide de la macro-goutte dans la phase d’établissement de l’arc est due à l’énergie (thermique et cinétique) amenée par les gouttelettes de métal fondu et à ”l’éclairage” direct de la cible par l’arc qui est plus large que la macro-goutte dans cette première phase. L’énergie mécanique des gouttelettes emmagasinée au cours de leur chute est transférée radialement facilitant ainsi la progression radiale de la macro goutte. Dans la deuxième phase, la macro-goutte est plus large que la base de l’arc électrique, l’effet de l’éclairage de l’arc sur la cible se trouve ainsi atténué, réduisant l’apport thermique et donc la facilitée de progression radiale de la macro-goutte. L’apport énergétique joue un rôle important dans la forme de la macro-goutte, que ce soit sous forme d’énergie amenée par le procédé ou par préchauffage de la cible métallique. En effet, on observe clairement un changement dans les proportions de la macro-goutte : plus l’énergie amenée à la cible augmente, plus la macro-goutte s’étale et se rapproche d’une calotte sphérique avec un rayon de base important. L’apport énergétique par unité de matière joue donc un rôle important à prendre en compte dans les modèles décrivant l’évolution de la macro-goutte.

5.4 Discussions : analyse adimensionnelle

Dans la section précédente, on a pu étudier et identifier quelques mécanismes caractéristiques dans le comportement de la macro-goutte. A travers cette nouvelle section, une analyse adimensionnée des quantités extraites expérimentalement est présentée. L'objectif est de proposer une première hiérarchisation des mécanismes impliqués dans le comportement dynamique de la macro-goutte.

5.4.1 Approche par le Théorème de Buckingham-Pi

Cette section est basée sur la prise en compte du théorème de Buckingham pour l'étude adimensionnelle du comportement de la macro-goutte de métal fondue en soudage GMAW stationnaire sur cible circulaire [154]. L'étude proposée s'inspire des travaux de van Elsen et al et Nguyen et al [26; 155]. Dans les analyses dimensionnelles, les paramètres pertinents pour décrire le système étudié sont regroupés en groupes de variables sans dimension. D'après le théorème de Buckingham, le nombre de groupes adimensionnels nécessaires pour décrire complètement le système physique considéré est égal au nombre de paramètres de contrôle moins le nombre de dimensions fondamentales utilisées dans ce système.

Il s'agit dans un premier temps de définir l'ensemble des grandeurs pouvant jouer un rôle dans le comportement dynamique de la macro-goutte :

Dimensions fondamentales Les dimensions fondamentales qui interviennent dans la description de cette opération de soudage sont au nombre de 5 :

- la longueur $[L]$
- la masse $[M]$
- le temps $[T]$
- la température $[\theta]$
- l'intensité de courant électrique $[I]$

Variables de sortie Le comportement de la macro-goutte peut-être décrit à l'aide de deux familles de variables. La première concerne la description de la géométrie de la macro-goutte :

- le rayon de base R_m
- la hauteur au centre h_m
- le volume V_m
- les angles de mouillage (sans dimension)

La seconde concerne la cinétique d'évolution de la macro-goutte et peut être traduite par la vitesse d'avance de la ligne triple (interface solide-liquide-gaz définissant le bord de la macro-goutte de métal fondu à la surface de la cible) : u_m .

Variables d'entrée Les variables d'entrée qui peuvent contrôler le processus de formation et d'évolution de la macro-goutte sont nombreuses, les principales étant :

1. la tension de soudage U
2. l'intensité de soudage I
3. la vitesse fil V_{fil}
4. la distance tube contact/pièce, "stick-out"
5. le diamètre du fil d'apport
6. le volume de métal apporté (par l'électrode fusible, fil d'apport)
7. la composition chimique du gaz
8. la tension de surface γ

9. la température initiale de la cible T_0
10. la conductivité thermique λ
11. la chaleur spécifique c_p
12. la masse volumique du métal ρ
13. la résistivité électrique r
14. le débit de gaz q

Il est possible de diminuer ce nombre de variables d'entrée en effectuant des regroupements entre elles (certaines sont assez liées). Le calcul du volume V_m de la macro-goutte peut ainsi être calculé à partir de la donnée du rayon de base et de la hauteur au centre de la macro-goutte, moyennant les hypothèses d'axisymétrie et de forme de calotte sphérique de la macro-goutte. De même, le volume de métal apporté est directement lié au diamètre du fil d'apport et à la vitesse fil. Il est aussi possible de regrouper la tension de soudage et l'intensité de soudage en un seul paramètre qui est la puissance de soudage $P = UI$. Ce choix permet également de s'affranchir d'une dimension fondamentale (l'intensité de courant électrique), car seule l'intensité de soudage est reliée à cette grandeur. De plus, ce choix permet aussi de ne pas prendre directement en compte en variables d'entrée la vitesse fil, le stick-out, le diamètre fil et la résistivité électrique dont les effets sont traduits par la puissance de soudage. De même, l'effet du gaz peut être traduit par la tension de surface γ rendant plus ou moins directement compte des effets de composition chimique et de débit [26]. En ce qui concerne les températures, il peut également être intéressant de considérer l'écart de température entre la température de la macro-goutte (supposée uniformément égale à la température de fusion du métal T_f) et la température initiale de la cible T_0 : $\Delta T = T_f - T_0$.

Finalement, dans une première approche, on peut considérer les variables d'entrée suivantes :

1. la puissance de soudage $P = UI$
2. la tension de surface γ
3. la différence de température entre la macro-goutte et la cible à l'état initial ΔT
4. la conductivité thermique λ
5. la chaleur spécifique c_p
6. la masse volumique du métal ρ

D'après le théorème de Buckingham, il faut donc prendre en compte $6 + 3 - 4 = 5$ groupes adimensionnels. Ces groupes adimensionnels sont construits selon la procédure d'assemblage décrite en annexe B.

Les 5 groupes adimensionnels obtenus sont :

$$\pi_1 = \frac{R_m \rho c_p^{1.5} \sqrt{\Delta T}}{\lambda} \quad (5.6)$$

$$\pi_2 = \frac{h_m \rho c_p^{1.5} \sqrt{\Delta T}}{\lambda} \quad (5.7)$$

$$\pi_3 = \frac{u_m}{\sqrt{\Delta T} c_p} \quad (5.8)$$

$$\pi_4 = \frac{P \rho c_p^{1.5}}{\lambda^2 \sqrt{\Delta T}} \quad (5.9)$$

$$\pi_5 = \frac{\gamma \sqrt{c_p}}{\lambda \sqrt{\Delta T}} \quad (5.10)$$

Les groupes adimensionnels π_1 à π_3 correspondent à des grandeurs de sortie (incluant des grandeurs d'entrée), tandis que les groupes adimensionnels π_4 et π_5 ne correspondent qu'à des grandeurs d'entrée.

Identification de nombres adimensionnels : Des combinaisons de groupes adimensionnels permettent de mettre en évidence des nombres adimensionnels qui peuvent décrire les mécanismes intervenant dans le comportement de la macro-goutte.

Il est ainsi possible de mettre en évidence :

1. Le nombre de Péclet :

$$\pi_1 \pi_3 = \frac{R_m \rho c_p u_m}{\lambda} = Pe \quad (5.11)$$

Il traduit le rapport entre le transfert par convection et le transfert par conduction.

2. Le nombre de Weber :

$$\frac{\pi_1 \pi_3^2}{\pi_6} = \frac{R_m \rho u_m^2}{\gamma} = We \quad (5.12)$$

Ce nombre sans dimension est utilisé en mécanique des fluides pour caractériser l'écoulement de fluides à l'interface d'un système multiphasique. Il correspond au rapport des forces d'inertie et la tension superficielle à l'interface.

3. Les nombres capillaire et de Prandtl :

$$\frac{\pi_3}{\pi_5} = \frac{Ca}{Pr} \quad (5.13)$$

Le nombre Ca sans dimension représente le rapport entre les forces visqueuses et la tension superficielle. Le terme u représente la vitesse de l'interface (Eq.5.14).

$$Ca = \frac{\mu u}{\gamma} \quad (5.14)$$

Le nombre de Prandtl (Pr) traduit le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique (Eq.5.15). Ce nombre compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Un Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un Prandtl faible (exemple : métaux liquides) indique que la conduction thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température. Le nombre de Prandtl ne dépend que des caractéristiques du matériau.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{Ca Pe}{We} \quad (5.15)$$

4. Les nombres de Bond et de Stefan :

D'autres grandeurs peuvent aussi intervenir dans la formation et le comportement de la macro-goutte, comme par exemple :

- l'accélération de la pesanteur g ($[L][T]^{-2}$)
- la chaleur latente de fusion L ($[L]^2[T]^{-2}$)
- le coefficient de dilatation thermique α ($[\theta]^{-1}$)

La prise en compte de ces grandeurs permet de considérer des nombres adimensionnels supplémentaires dans la description, tels que les nombres de Bond et de Stefan (étant donné la faible valeur de la masse volumique des gaz comparativement à celle du métal liquide, la différence de masse volumique est considérée comme égale à la masse volumique du métal liquide) :

$$\frac{\pi_1}{\pi_5} \frac{R_m g}{L} = Bo Ste \quad (5.16)$$

Le nombre de Bond (Bo) représente le rapport entre les forces gravitationnelles et la tension de surface sur une interface entre deux fluides (Eq.5.17). Le terme $\Delta\rho$ représente la différence des masses volumiques des deux fluides. On considère ici le rayon de la macro-goutte R_m obtenue en fin d'essai (cas le plus défavorable pour l'effet de la gravité) comme terme de grandeur caractéristique du système.

$$Bo = \frac{R_m^2 \Delta\rho g}{\gamma} \quad (5.17)$$

Le nombre de Stefan (Ste) est utilisé en phénomène de transfert pour étudier le transfert thermique lors d'un changement de phase solide-liquide. Il représente le rapport entre la chaleur sensible et la chaleur latente (Eq.5.18).

$$Ste = \frac{c_p(T_f - T)}{L} \quad (5.18)$$

5. Les nombres de Grashof et de Ohnesorge :

$$\frac{\pi_1}{\pi_5} \frac{R_m g \alpha}{c_p} = Gr Z^2 \quad (5.19)$$

Le nombre de Ohnesorge (Z) caractérise la déformation des bulles et gouttes. Il traduit le rapport des forces visqueuses avec la tension de surface et les forces d'inertie, décrivant la capacité à résister à l'étalement (Eq.5.21). Pour les nombres Z élevés, la résistance est de type visqueuse, pour les valeurs faibles, elle est de type inertielle.

$$Z = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\gamma R_m}} \quad (5.20)$$

On peut aussi écrire :

$$Z^2 = \frac{Ca^2}{We} \quad (5.21)$$

Le nombre de Grashof (Gr) caractérise le rapport entre les forces de flottabilité ("buoyancy forces") et les forces visqueuses (Eq.5.22), lorsque la gravité est prise en compte (les forces de flottabilité sont souvent négligées dans le cas des bains de fusion de soudage [59]).

$$Gr = \frac{R_m^3 \rho^2 g \alpha \Delta T}{\mu^2} \quad (5.22)$$

Le terme α correspond au coefficient de dilatation thermique (K^{-1})

6. et enfin, il est possible d'introduire des nombres "adimensionnés" qui vont traduire le comportement de la macro-goutte tels que des paramètres de forme comme l'étalement par exemple :

$$\frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{R_m}{h_m} \quad (5.23)$$

5.4.2 Application à la macro-goutte et discussions

Les nombres adimensionnels présentés dans la précédente section, sont à présent utilisés avec les quantités dimensionnelles extraites lors de la première analyse (section 5.3.2). Les grandeurs physiques sont alimentées par les valeurs numériques données par la littérature [59; 26] (table 5.3). Il s'agit pour la plupart de valeurs moyennes. Il est admis que la masse volumique de l'acier varie peu avec la température. La température initiale de la cible est notée T_s , la température de la macro-goutte T_m est supposée égale à la température de fusion de l'acier T_f .

TABLE 5.3 – Valeurs numériques fournies par la littérature pour différentes grandeurs.

Symboles	Grandeurs (unités)	Valeurs [59]
γ	tension de surface ($N.m^{-1}$)	1,67
ρ	masse volumique ($kg.m^{-3}$)	7200
μ	viscosité dynamique ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)	0,006
c_p	chaleur spécifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	753
T_f, T_m	température de fusion, de la macro-goutte ($^{\circ}K$)	1798
L	chaleur latente de fusion ($J.kg^{-1}$)	$2,77.10^5$
λ	conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	26

5.4.2.1 Analyse du paramètre d'étalement R_m/h_m

Ce premier paramètre (Eq.5.23), traduit le rapport entre le rayon et la hauteur de la macro-goutte en cours de soudage. Les observations effectuées sur ce paramètre en relation avec la variation du temps de soudage (essais code S) et de la température initiale de la cible (essais code T) sont en adéquation avec celles effectuées dans la partie "dimensionnelle" et ne sont volontairement pas détaillées ici.

Effet de la composition du gaz (code G) Au début du régime établi, pour un volume normalisé donné, les angles sont d'autant plus faibles que le % de CO_2 est élevé. Par contre cet effet s'atténue lorsqu'on s'approche de la fin de l'essai (solidification) (figure 5.34).

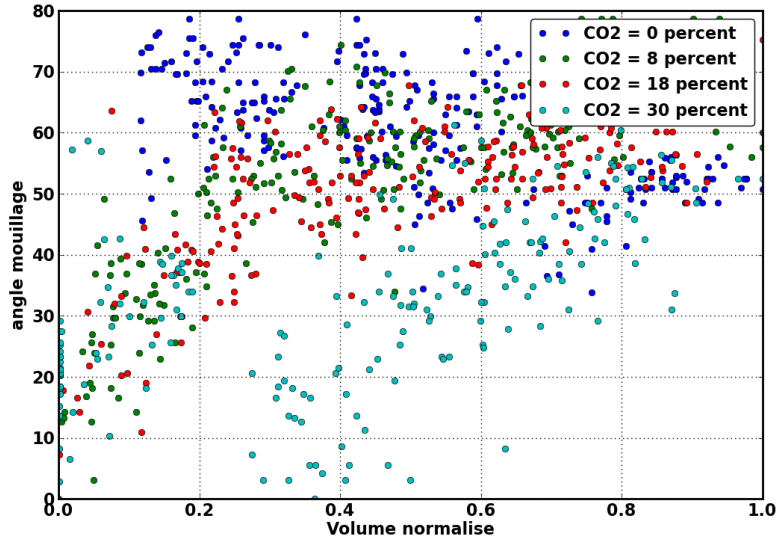


FIGURE 5.34 – Evolution des angles de mouillage en fonction des volumes normalisés (type G)

Pour un même étalement, l'angle de mouillage diminue avec l'augmentation du % CO_2 , ce qui traduit l'effet du CO_2 sur la mouillabilité (section 5.3.2.5). On peut aussi constater que l'étalement augmente avec le % CO_2 pour un volume normalisé identique (figure 5.35). De ces deux constatations, on peut tirer une information sur l'évolution de la tension de surface avec le % CO_2 . On considère la relation de Young-Dupré au niveau de la ligne triple (étalement fixé) :

$$\gamma_{lg} \cos(\theta) = \gamma_{sg} - \gamma_{ls} \quad (5.24)$$

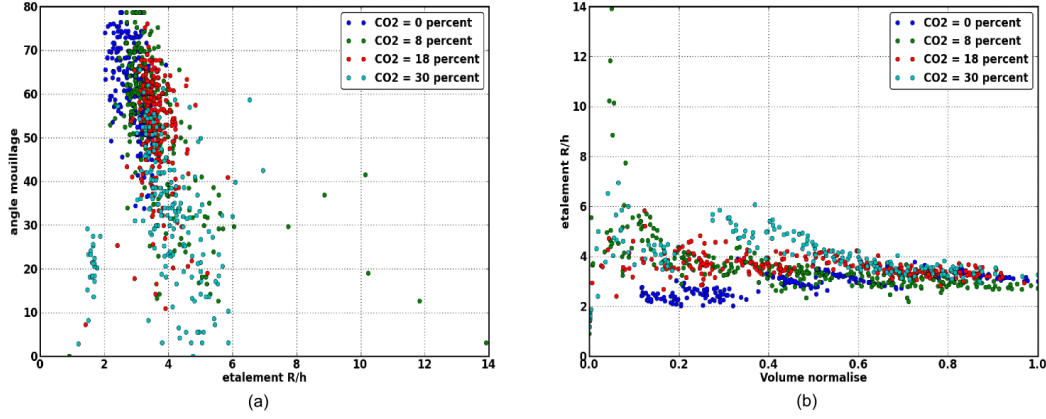


FIGURE 5.35 – Angle de mouillage en fonction du paramètre d'étalement et paramètre d'étalement en fonction des volumes normalisés (type G)

Les angles de mouillage étant inférieurs à $\pi/2$, l'évolution du cosinus est monotone. Si on suppose que les énergies interfaciales solide/gaz et liquide/solide sont peu affectées par la composition chimique du gaz (raisonnable surtout relativement à l'interface liquide/gaz et par rapport à la zone "éclairée" par l'arc), on peut en déduire que la tension de surface de la macro-goutte diminue avec l'augmentation du % CO_2 et donc la mouillabilité augmente avec le % CO_2 (angle de mouillage diminue).

Les tensions de surface de la gouttelette peuvent être estimées pour une configuration donnée en se basant sur l'extraction, à partir des images acquises, des périodes d'oscillations de la gouttelette en vol libre [105] et sur les conclusions de la section 5.3.1.2 ($U_a = cte$). Ainsi, il est possible de calculer les niveaux de tension superficielle du métal en fusion suivant la nature de l'arc (fonction de l'énergie et du gaz de protection) à partir de l'expression suivante [105] :

$$\gamma = \frac{3 \pi \rho V_{droplet}}{8 \tau^2} \quad (5.25)$$

avec :

- γ la tension de surface ($N.m^{-1}$)
- ρ la masse volumique ($kg.m^{-3}$)
- $V_{droplet}$ volume de la gouttelette (m^3)
- τ la période d'oscillation de la gouttelette (s)

Les résultats obtenus sont en accords avec ceux trouvés dans la littérature [105]. Dans le cas de l'argon, on trouve $\gamma = 1.6 N.m^{-1}$ et pour les mélanges binaires $Ar + CO_2$, $\gamma = 1.2 N.m^{-1}$.

Les nombres capillaires sont calculés pour les différents gaz employés. La figure 5.36 présente l'évolution des angles de mouillage en fonction des valeurs du nombre capillaire. On peut constater que, pour l'ensemble des essais, celui-ci n'excède pas 10^{-5} , ce qui indique des effets de tension superficielle prédominant vis-à-vis de ceux visqueux [156]. De plus, la tendance d'évolution démontre que l'angle apparent de mouillage augmente avec la tension de surface.

Effet de la vitesse de dévidage du métal d'apport (code V) On remarque une évolution croissante de l'étalement de la macro-goutte avec celle de la vitesse d'apport du fil (figure 5.37(a)). Ce résultat confirme les tendances observées à la section 5.3.2.2.

Effet de la fréquence de pulsation (code F) Il semblerait que la fréquence ait peu d'effet sur le comportement de la macro-goutte (cf. 70 et 115 Hz, figure 5.37(b)) hormis pour une

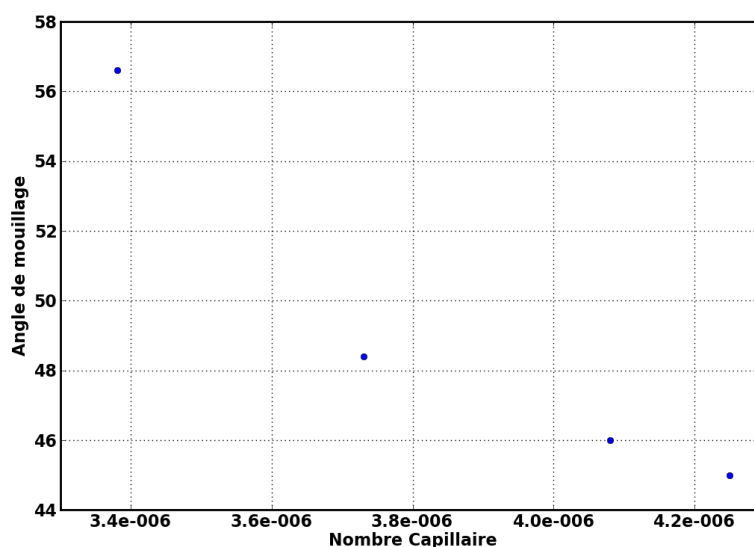


FIGURE 5.36 – Angles de mouillage moyens en fonction des nombres capillaires calculés (type G)

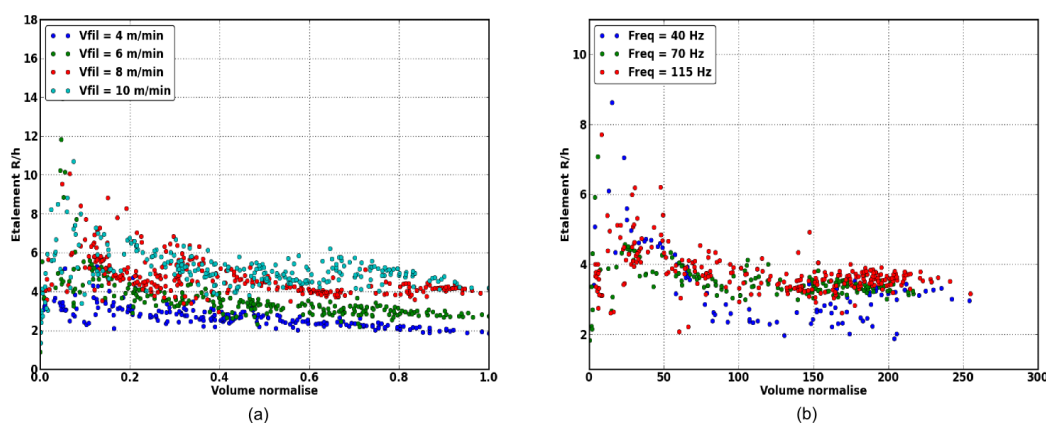


FIGURE 5.37 – Evolution du paramètre étalement en fonction des volumes normalisés : (a) type V et (b) type F

fréquence particulière (40 Hz), qui pourraient être liée au comportement propre du bain. Ce résultat est en accord avec ceux présentés à la section 5.3.2.3.

5.4.2.2 Comportement global

Le comportement global de la macro-goutte permet de mettre en évidence quelques caractéristiques communes à l'ensemble des essais. Le nombre de Bond (Bo) inférieur à 2,5 indique que la compétition entre l'effet gravitaire et de tension de surface est équilibrée. Ce qui explique l'obtention d'une forme de type calotte sphérique de la macro-goutte. Le nombre de Ohnesorge (Z) inférieur à 0,012 pour la phase d'établissement montre que les effets de viscosité peuvent se faire sentir mais une fois le régime établi atteint (phase 2), son influence est moindre vis-à-vis de ceux d'inertie et de tension de surface ($Z < 10^{-3}$). Les résultats du nombre de Weber (We) illustrent l'importance des effets de tension superficielle par rapport aux effets inertiels. Les valeurs

calculées pour le nombre de Grashof (Gr) nous permettent de négliger les effets de flottabilité.

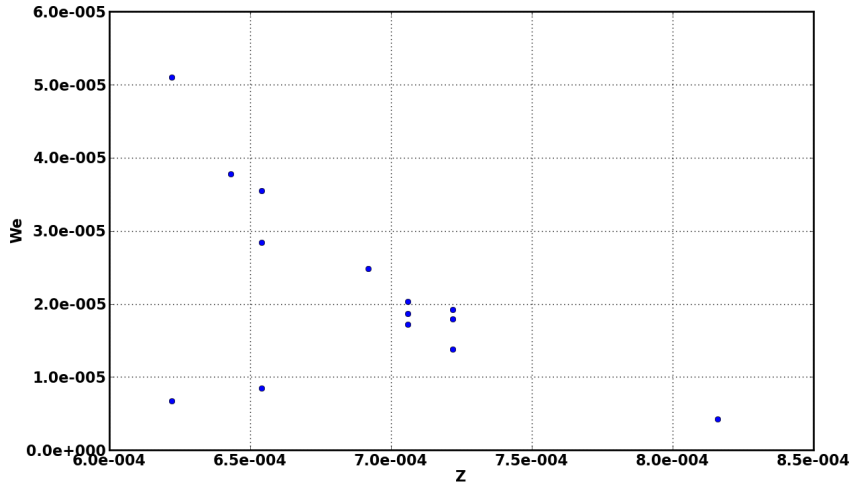


FIGURE 5.38 – Evolution du nombre de We en fonction du nombre de Z

La figure 5.38 résume le comportement global si l'on considère que le système est isotherme. Toutes les expériences se situent dans un domaine pour lequel, We et $Z \ll 1$. Ceci indique que l'étalement de la macro-goutte est gouverné par les forces capillaires et freiné par les effets inertiels au niveau de la ligne triple. Les effets associés à l'impact des gouttelettes sont négligeables (Quantité de mouvement négligeable) et les effets visqueux sont faibles [151].

De façon classique, la vitesse de propagation d'une goutte au cours d'un dépôt d'un liquide sur une surface solide peut être estimée comme une fonction de l'angle de mouillage (ou plus exactement le nombre capillaire image de la vitesse comme une fonction de l'angle de mouillage dynamique et de l'angle à l'équilibre). Cette relation (Eq.5.26), connue sous le nom de loi de Hoffman, traduit l'importance du rôle des effets de la tension de surface dans la propagation de la goutte isotherme déposée [156; 157].

$$Ca = \frac{\mu u}{\gamma} = k(\theta_m^a - \theta_e^a) \quad (5.26)$$

Pour notre étude, l'angle de mouillage présente des variations rapides, une hystérésis importante et une forte sensibilité aux conditions environnantes (thermique...). Les conditions dans laquelle les mesures sont effectuées (présence d'un arc électrique et variations très rapides) rendent encore plus difficile une caractérisation précise de l'évolution de l'angle de mouillage en cours de soudage, malgré tout il est possible de dégager des tendances sur les valeurs moyennes.

La figure 5.39(a) présente le résultat obtenu pour le régime établi du système. Le nombre Capillaire (Ca) inférieur à 2.10^{-5} démontre une fois de plus que les effets de la tension de surface sur la macro-goutte sont prédominants sur les effets de viscosité. Effectivement, pour les angles de mouillage faibles, le nombre Ca est grand, les tensions superficielles diminuent. Ceci n'indique pas nécessairement que les tensions superficielles sont prédominantes tout au long de la phase 2. De plus, la loi de Hoffman n'est pas vérifiée. Ce constat indique que les effets capillaires importants ne sont pas seuls responsables du mouillage de la macro-goutte. A la figure 5.39(b), il est intéressant de situer l'évolution des angles de mouillage de notre système en fonction du nombre Ca vis-à-vis de l'étude de Schiaffino [151] pour le dépôt de cire. On remarque que, dans ce cas, le système macro-goutte vérifie la loi de Hoffman, mettant en

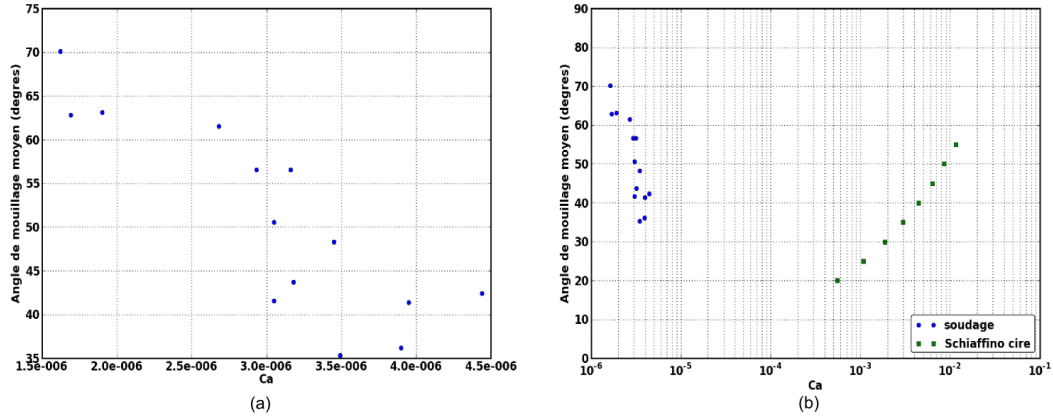


FIGURE 5.39 – Angle de mouillage à la fin de la phase établie en fonction nombre Ca

évidence des effets capillaires prédominants. Cependant, les valeurs du nombre Ca pour le dépôt de cire démontrent une compétition équilibrée entre les effets visqueux et de tension superficielle [156]. Cette comparaison entre le dépôt de métal liquide et le dépôt de cire démontre une fois de plus que les effets capillaires ne sont pas les seuls à gouverner le comportement dynamique de la macro-goutte en cours de soudage.

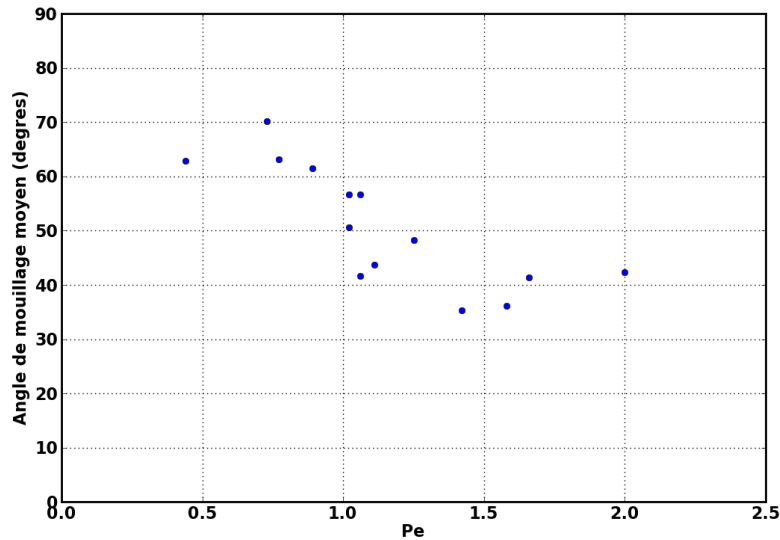


FIGURE 5.40 – Angle de mouillage à la fin de la phase établie en fonction du nombre de Peclet

On peut alors penser que l'étalement de la macro-goutte est plutôt régi par des phénomènes de transferts thermiques et de changements de phase. On utilise le nombre de Peclet (Pe) pour comparer les effets des transferts thermique par convection (par le fluide) et par conduction dans la couche de métal solide de la cible. Les valeurs moyennes de Pe entre 1,7 et 5,4 calculées pour la phase d'établissement, puis voisine de 1 ensuite (comprises entre 0,4 et 2) traduisent une compétition équilibrée entre les transferts par convection et par conduction, avec un léger avantage à la convection. Une tendance entre l'angle de mouillage moyen et le nombre de Péclet apparaît à la figure 5.40. Pe diminue quand l'angle de mouillage augmente. A noter que les valeurs de Pe sont minorées car calculées avec les vitesses de la ligne triple mesurée (U_m) ; il est en effet très probable que la vitesse réelle du fluide soit plus élevée (cellules de convection).

Le nombre de Stefan (Ste) supérieur à 1, semble indiquer que les transferts thermiques s'effectueraient sans changement de phase. Enfin, le nombre de Prandtl (Pr) est égal à 0,17 pour tous les essais car il dépend seulement des caractéristiques matériaux. Ce faible nombre montre que le profil des vitesses a peu d'effet sur le profil de température, ce qui s'explique par une conduction thermique rapide et les caractéristiques des métaux à l'état liquide.

En conclusion, le comportement global de la macro-goutte semblerait gouverné par les effets de tension de surface, de gravité, et de transferts thermiques.

5.5 Conclusion

L'étude de la formation et de l'évolution d'une macro-goutte de métal liquide en situation de soudage GMAW pulsé a été possible grâce à un dispositif expérimental spécifique. Les résultats montrent la possibilité d'accéder à différents paramètres caractéristiques qui peuvent évoluer rapidement au cours du soudage. Il a ainsi été possible de caractériser la forme de la macro-goutte, son évolution et l'existence de deux phases distinctes (création et croissance à régime établi) quel que soit le paramètre variable au cours des essais. Une première étude aux dimensions a aussi permis de montrer l'importance de l'apport énergétique, de la tension de surface et de la gravité dans la caractérisation de la macro-goutte. Ce type d'approche devrait permettre d'enrichir la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu et de proposer ultérieurement des modèles simplifiés d'analyse ou de sensibilité.

D'un point de vue académique, le dépouillement des données à une échelle plus fine, ainsi que de nombreux essais en courant lisse de refusion afin de s'affranchir des effets dynamiques dus à la pulsation du courant, sont à envisager. Les essais proposés dans ce chapitre se situent dans des configurations opératoires conventionnelles. On peut ainsi imaginer utiliser ce dispositif pour étudier l'influence des gaz de protection ainsi que différents métaux d'apport sur le bain de fusion. On sait par exemple que la mouillabilité est un critère important pour la tenue mécanique d'un assemblage soudé. Aussi, les outils mis en place pourraient être le support pour le développement de solution de monitoring, comme l'analyse des trajectoires présentées à la section 5.3.1.2 (figure 5.17). Les quantités géométriques (R_m , h_m , etc.) ou les vitesses d'évolution des gouttelettes en vol libre U_a et de la ligne triple U_m pourraient alimenter la simulation numérique.

Enfin les résultats de l'étude du comportement de la ligne triple suivant l'énergie à la source, la chimie de l'arc et le volume de matière amené, vont être utiles pour l'analyse d'une instabilité du bain de fusion en Soudage Grande Vitesse. Les premiers résultats et pistes de réflexion sont développés dans le chapitre suivant.

Chapitre 6

Perspectives pour l'analyse d'une instabilité en Soudage Grande Vitesse

6.1 Introduction

Le chapitre 5 concerne l'étude d'une quantité de métal maintenue liquide (macro-goutte) sur un substrat solide en régime stationnaire. L'approche développée dans cette étude a permis d'identifier des mécanismes physiques (tensions superficielles, gravité et transferts thermiques) qui semblent prépondérants dans le comportement de la macro-goutte. La transposition de cette étude à la réalisation d'un joint soudé introduit une problématique supplémentaire due à la vitesse d'avance du procédé qui va engendrer des mouvements de fluide.

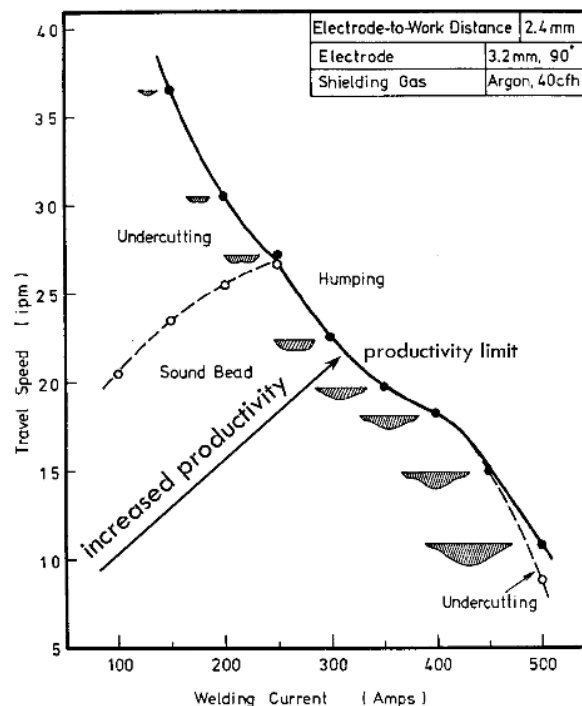


FIGURE 6.1 – Cartographie des instabilités du bain de fusion suivant la vitesse et l'énergie du procédé TIG [158]

La vitesse d'avance est en effet un paramètre procédé important dans le cadre des applications industrielles. Le cas du Soudage Grande Vitesse, dans lequel on cherche à obtenir productivité et qualité, en est un exemple majeur. Le choix des paramètres opératoires (vitesse, énergie) peut conduire à la formation d'instabilités en cours de soudage, responsables de défauts sur les cordons de soudure (figure 6.1).

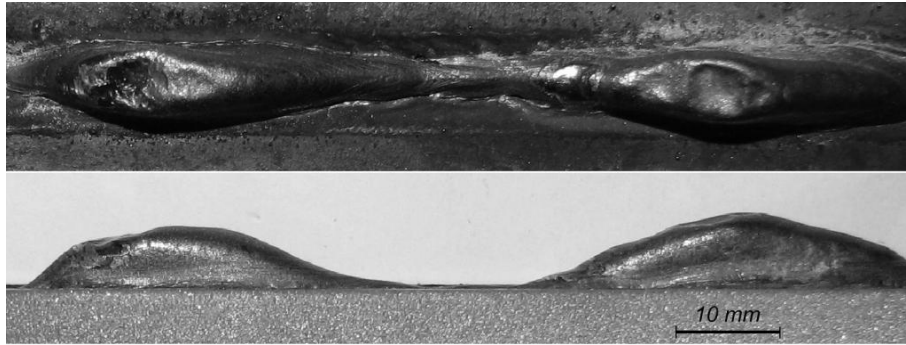


FIGURE 6.2 – Soudure constituée de "Hump" et de "Valley"

Un de ces défauts majeurs qui peut apparaître dans les gammes d'énergies usuelles lorsqu'on augmente trop la vitesse est le humping. Ce défaut se caractérise par la présence de ruptures régulières du cordon : **hump** correspondant à des amas de matière et **valley** correspondant à des zones sèches (figure 6.2). Ce défaut classique existe aussi bien pour les procédés à l'arc de type **GMAW** [26], **GTAW** [159] que pour les procédés à haute densité d'énergie tel que le faisceau d'électrons (**EWB**) et le soudage laser (**LBW**) [147].

Même si des solutions industrielles sont connues pour limiter l'apparition du humping, ce défaut pose encore de nombreux problèmes quant à la compréhension physique des phases d'initiation et de propagation des instabilités. Il s'agit en effet d'une problématique complexe dans laquelle les aspects d'hydrodynamique, de thermique, de mouillage, etc, sont fortement couplés [146]. L'objet de ce chapitre prospectif est de proposer des pistes d'analyses et de réflexions sur la base de l'approche proposée.

6.2 Éléments bibliographiques

A ce jour, de nombreux modèles phénomologiques ont été proposés dans le but d'expliquer et de décrire les mécanismes physiques responsables du humping pour les procédés de soudage autogènes et non-autogènes [52; 146; 160].

Nguyen et al [161] ont récemment proposé un modèle fluide du phénomène de humping en soudage grande vitesse **GMAW**, lequel est illustré à la figure 6.3. Les actions combinées de la pression de l'arc électrique et la quantité de mouvement amenée par les gouttelettes en vol libre provenant de l'électrode fusible génèrent une dépression à l'avant du bain de fusion. Ces actions poussent le métal en fusion vers l'arrière du bain au travers de rouleaux de convection qui s'accumulent et grossissent jusqu'à obtenir un hump. Périodiquement, la solidification d'un premier hump conduit à une constriction de la zone de métal en fusion (partie supérieure du hump), stoppant son alimentation, ce qui va entraîner l'apparition d'un nouveau hump un peu plus loin. Les modèles tels que ce dernier, proposent une description des mécanismes mis en jeux et facilitent l'identification des paramètres impliqués dans le humping, mais ne permettent pas de prédire quantitativement dans quelles conditions apparaîtra cette instabilité. Le choix des paramètres opératoires, et notamment gaz de protection et source de courant, sont en effet des paramètres de l'opération de soudage qui influent sur le domaine d'apparition du humping.

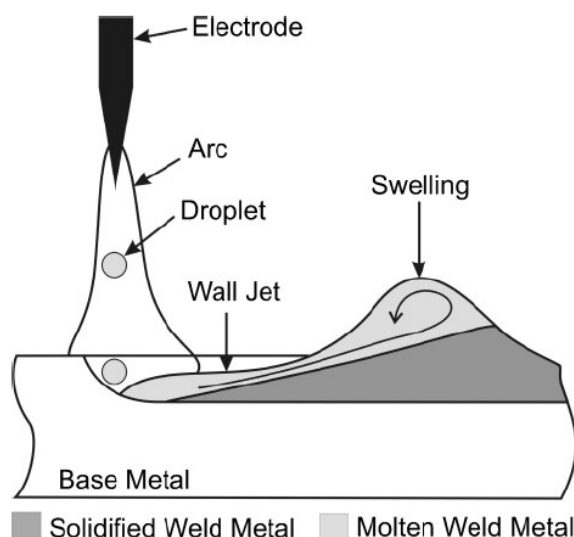


FIGURE 6.3 – Modèle fluide de humping **GMAW** [26]

Cho et al [149] utilisent un modèle fluide (bain / surface libre) prenant en compte les aspects thermiques induits par le procédé, la pression d'arc et la variation de tension superficielle. Cette étude a pour objectif d'aider à une meilleure compréhension du humping. L'objectif de ces travaux est d'accéder aux cinétiques d'écoulement et à la cartographie thermique du bain de fusion. La comparaison expérimentation/simulation, effectuée sur la base d'essais avec une caméra thermique rapide (400 i/s), met en évidence une bonne corrélation entre la géométrie et les isothermes de la soudure (figure 6.4).

Dans l'étude du humping pour le procédé **GTAW** sur les aciers inoxydables (304L), Mendez et al [160] proposent une analyse adimensionnelle sur des aspects spécifiques des phénomènes de humping (undercutting), mais également pour identifier les paramètres procédé et les mécanismes physiques du humping les plus importants. L'objectif est la prédiction des conditions

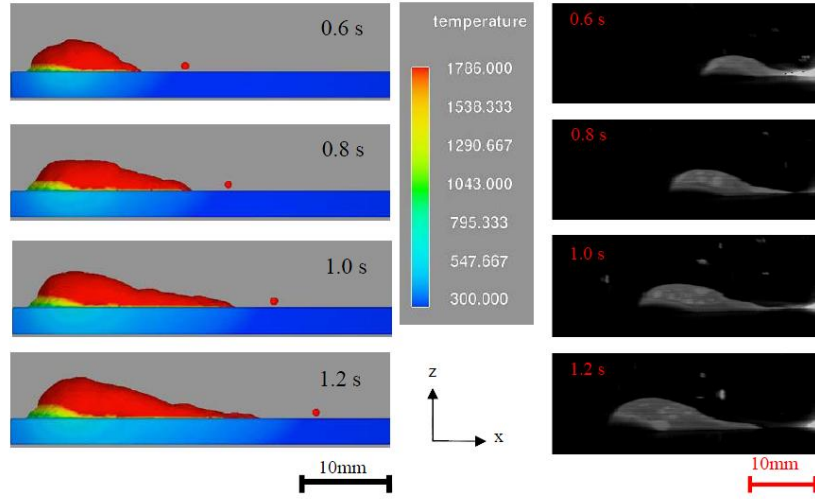


FIGURE 6.4 – Comparaison de séquences d’images thermiques (températures en degrés K) vue de profil pour la simulation et l’expérimentation d’une soudure avec le phénomène de "humping" [103]

opératoires pour lesquelles ce défaut est observé. Nguyen [161] utilise également cette méthode d’analyse adimensionnelle pour prédire, suivant la configuration de soudage, la frontière entre une soudure sans et avec défaut de humping (figure 6.5). Cette méthode permet d’étudier également l’influence des nombreux paramètres du procédé GMAW sur l’apparition des défauts, en regroupant les paramètres en groupes adimensionnels, facilitant ainsi l’analyse des résultats.

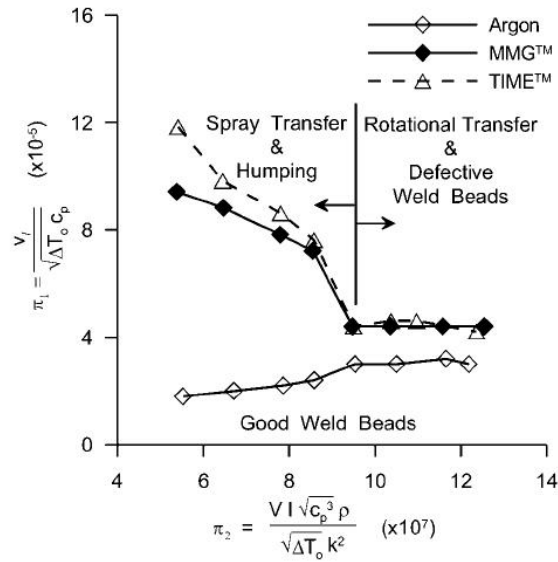


FIGURE 6.5 – Corrélation entre deux groupes adimensionnels (π_1 , π_2) de Nguyen et al [26] pour la prédiction du humping suivant le mode opératoire en GMAW

Schiaffino [150] est également confronté au phénomène de humping dans le cadre du dépôt de cire sur un substrat solide. Après observation des premières expériences, il focalise son attention sur le comportement dynamique de la ligne de contact. C’est dans un objectif de compréhension qu’il commence par une analyse adimensionnelle d’une macro-goutte stationnaire pour ensuite

utiliser son analyse sur la configuration avec le déplacement de la source de cire qui fait apparaître des défauts de type humping. Cette configuration est cependant moins complexe car non soumise à des effets de champs électromagnétiques ou de variation rapide de température comme dans le cas du soudage.

R. Fabbro et al [147; 162] ont étudié le humping en soudage laser (LBW). Les vitesses d'avance pour atteindre de tel régime avec une source de 4 kW sur un spot de diamètre 0.6 mm sont de l'ordre de 20 m.min^{-1} . Le descriptif du régime de humping est le suivant (figure 6.6) : L'écoulement principal du métal en fusion provient de la base du keyhole, il est fortement dévié vers l'arrière du bain et s'élève jusqu'à un niveau nettement inférieur vis-à-vis de la surface de l'éprouvette soudée (figure 6.6). Il reste attaché à la paroi latérale sur une distance d'environ 2 mm puis une partie centrale de ce flux est détaché et forme une mince bande liquide qui se propage vers l'arrière à grande vitesse. C'est le long de cette veine étroite et liquide que les bosses sont générées à une certaine distance du point de détachement. Ils observent généralement au delà de 2 mm de ce point de détachement un retrait ou une striction de la veine liquide due à l'instabilité de Rayleigh qui est gouvernée par les tensions de surface. Il y a alors un refroidissement localisé de ce retrait qui conduit à l'arrêt de l'écoulement et à la croissance du hump. Cette croissance est stoppée lors de la striction suivante de l'écoulement, et ce, de façon périodique, le phénomène se répète ainsi tout au long de la soudure.

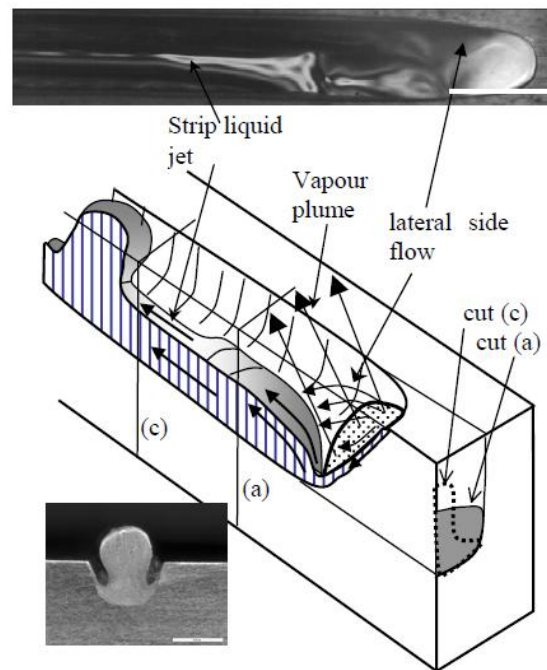


FIGURE 6.6 – Schéma régime humping en LBW [147; 162]

Pour conclure avec quelques ordres de grandeurs, en TIG, le humping existe dans le cas du soudage des aciers en courant lisse au-delà d'une puissance délivrée de 4 kW et d'une vitesse d'avance de 1.5 m.min^{-1} [158]. Pour le même matériau en soudage MIG, cette instabilité peut apparaître pour une puissance entre les électrodes de l'ordre de 8 kW et une vitesse d'avance de l'ordre de 3 m.min^{-1} [26; 161].

Enfin, les analyses descriptives du régime établi de humping pour les procédés à arc comme pour ceux à haute densité d'énergie sont proches. La modélisation de ce phénomène une fois établi, est bien connue. Cette instabilité existe aussi pour le dépôt de cire. Cette application se distingue par l'absence d'un arc électrique et de forts gradients thermiques. Ainsi, l'hydrodynamique

mique du bain de fusion combinée aux gradients de tension superficielles semblent jouer un rôle important dans l'apparition d'instabilités en cours de soudage grande vitesse.

6.3 Analyse préliminaire du phénomène de humping

Le phénomène est dans une première approche étudié à travers des images acquises en cours de soudage. L'analyse d'une soudure "humpée" est ensuite proposée.

6.3.1 Identification du humping en cours de soudage

Le phénomène de **humping** est mis en évidence grâce à quelques expériences préliminaires. Les paramètres de soudage initiaux ont été choisis dans la littérature [26] ($V_{fil} = 20 m.min^{-1}$ et $V_{soudage} = 3 m.min^{-1}$).

Les paramètres procédés tension et intensité sont enregistrés en continu et la caméra rapide est utilisée pour l'acquisition d'images. L'orientation de la caméra en fonction de la direction de soudage est illustrée à la figure 6.7. Le méthode optique utilisée pour visualiser l'arrière du bain de fusion GMAW est un filtre interférentiel à bande étroite (650 nm) sans éclairage additionnel. Le dispositif optique et la torche de soudage sont fixes.

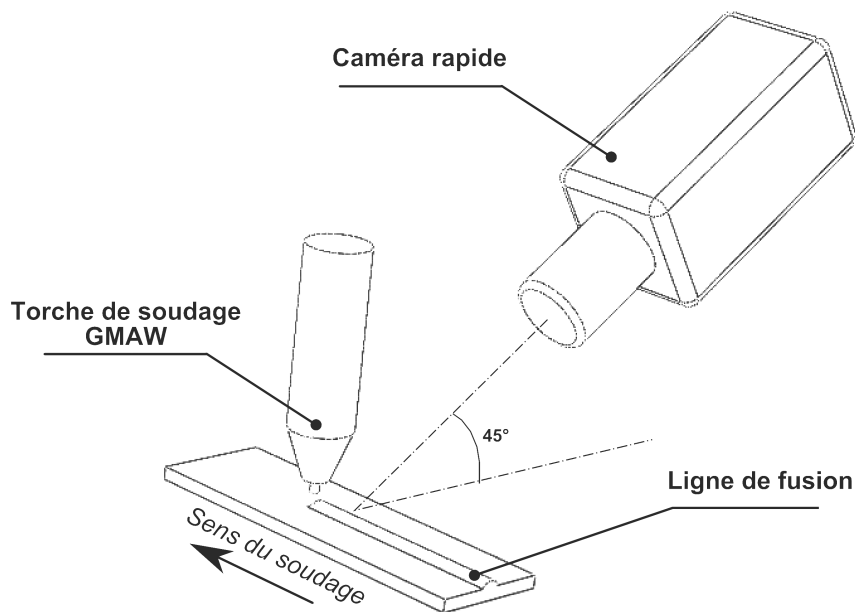


FIGURE 6.7 – Position de la caméra vis-à-vis de la pièce soudée

En cours de soudage, du fait de la grande vitesse d'avance, il se forme une fine et étroite veine de métal en fusion qui constitue l'arrière du bain fondu (figure 6.8, phase 1). Une réduction de la veine liquide apparaît, qui, couplée à une solidification rapide de ce petit volume de métal liquide, freine l'écoulement du métal en fusion, alimentant ainsi le bain fondu en amont (phase 2). Cette "barrière solide" constitue une bosse ("hump") qui continue à être alimenté en métal liquide jusqu'à atteindre une forme et un volume provoquant une modification de l'écoulement. Cette modification de l'écoulement conduit à l'apparition d'une nouvelle fine et étroite veine de métal liquide (phase 3) puis à la formation d'un nouveau "hump" (phase 4)...

Il est également intéressant de constater que le signal de la tension d'arc n'est pas perturbé par ce phénomène. Ce constat indique que la position de la surface libre suivant l'axe de la torche

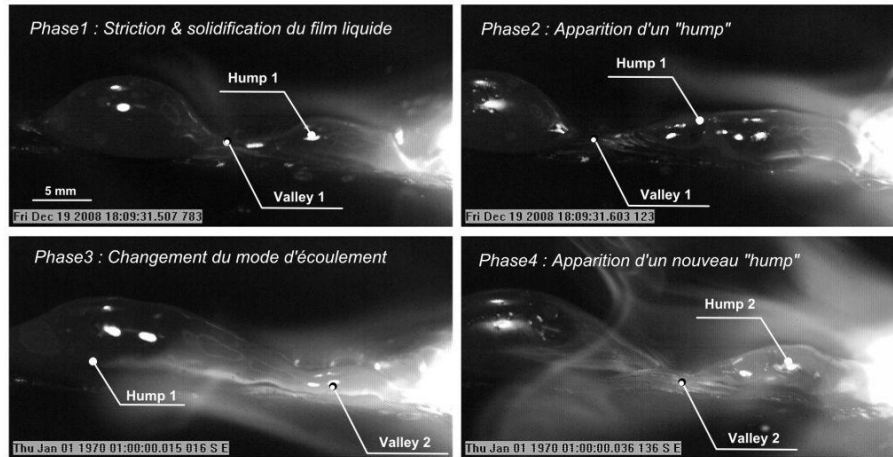


FIGURE 6.8 – Etapes et mécanismes du "humping"

sous la zone éclairée par l'arc électrique est stable. La génération des humps semblerait donc se produire à l'arrière du bain de fusion.

6.3.2 Conséquences du humping sur la soudure

La figure 6.9(a) présente une soudure de Nguyen et al. [26] constituée de "Hump" et de "Valley", ces motifs se répétant de façon régulière le long du cordon.

Les macrographies d'une valley et d'un hump présentent une structure métallographique non-homogène suivant la hauteur de la soudure (figure 6.9(b,c)). La partie pénétrée montre des petits grains alors que celle apparente en présente de gros. Cette microstructure semblerait traduire la chronologie de la phase de solidification de cette zone. En effet, à l'image de la solidification de la macro-goutte (section 5.3.1.3), celle du hump s'effectue de la base vers le sommet. Il est aussi intéressant de noter que la largeur à la base de la soudure est constante tout au long du cordon. Les angles de mouillage (solidifiés) sont supérieurs à 90° pour la section "hump" (figure 6.9(c)). La variation de la mouillabilité entre le hump et la valley, semble traduire des gradients de tension superficielle suivant la direction longitudinale du bain de fusion.

Ces premières expériences permettent de mettre en évidence les différentes phases d'apparition du "humping" (figure 6.8), en adéquation avec des résultats récents [103; 26]. Le comportement hydrodynamique combiné aux tensions de surface et aux changements de phase semblent être prépondérants pour le régime établi du phénomène de humping. L'observation de la soudure a montré la périodicité du régime et une largeur constante à la base du bain de fusion tout au long de la soudure. Il semble alors intéressant de caractériser l'évolution de la géométrie du bain de fusion au cours de la formation d'un hump.

6.4 Une expérience dimensionnelle

L'objet de cette expérience est d'accéder à la dynamique d'apparition et d'évolution du phénomène de humping. La caractérisation du comportement du bain de fusion en déplacement en cours de soudage est menée avec l'approche utilisée pour l'étude de la macro-goutte.

6.4.1 Protocole expérimental

L'objectif est de visualiser l'apparition et la phase d'évolution d'un hump en cours de soudage. Des lignes de fusion sont exécutées sur une éprouvette d'acier S235 d'épaisseur 8 mm. Les

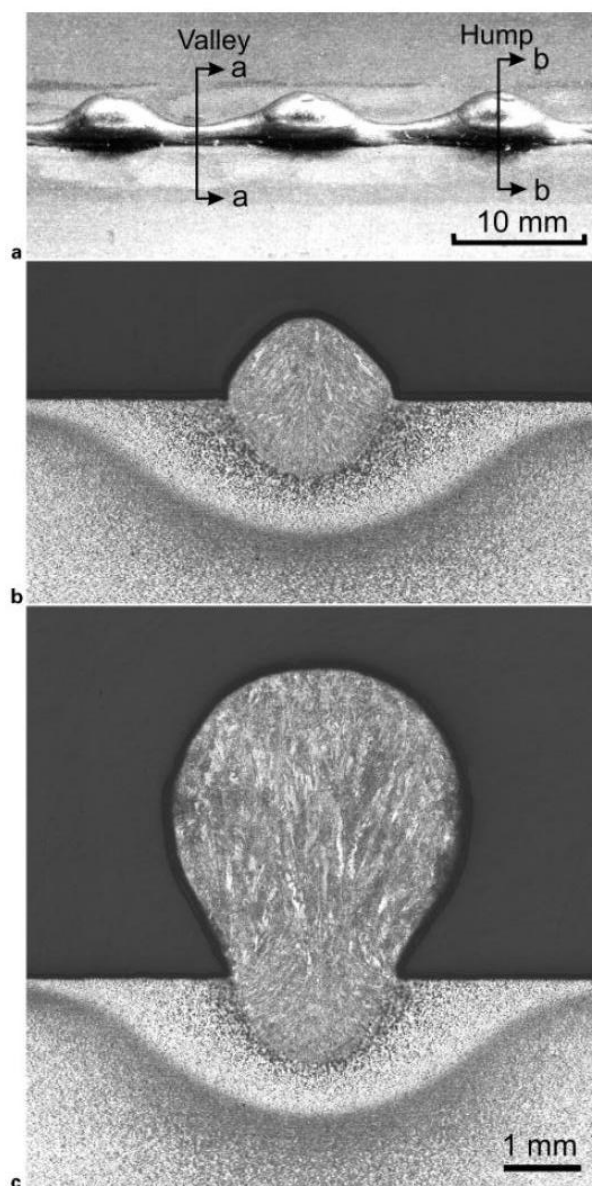


FIGURE 6.9 – Soudure constituée de "Hump" et de "Valley" (a), macrographies d'une valley (b) et d'un hump (c) [26]

paramètres procédé choisis sont présentés au tableau 6.1. La vitesse fil a été choisie en fonction des essais réalisés au chapitre 5. De cette manière, la vitesse moyenne des gouttelettes en vol libre est connue. L'énergie délivrée par la source étant également connue, la vitesse de soudage pour observer le humping est alors déduite d'après la littérature [26].

La caméra est fixée sur la table XY. Ainsi la caméra et l'éprouvette sont solidaires dans le déplacement, alors que la torche reste fixe. Le dispositif optique utilisé reste le même que celui de l'étude Macro-goutte. Seul le champ de vision évolue (1024*512 pixels au lieu de 256*256). La prise de vue latérale rasante sur l'éprouvette permet de bien visualiser l'évolution du front de la soudure. De cette manière, il est possible de suivre l'apparition et la croissance d'un hump (figure 6.10).

Les images sont traitées avec la fonction **erHumpAnalysis** d'**erCv**. Ce traitement permet de détecter la surface libre du bain de fusion au cours du temps, soit pour cette étude, la dynamique d'évolution d'un hump en cours de soudage (figure 6.11).

TABLE 6.1 – Paramètres de soudage utilisés pour l'expérience.

Vitesse de soudage V_s ($cm.min^{-1}$)	120.
Vitesse fil V_{fil} ($m.min^{-1}$)	6.
Métal d'apport	ER70S
Diamètre fil (mm)	1.
Stick out (mm)	20.
Nature gaz de protection	92%Ar - 8%CO ₂ .
Débit gaz de protection ($l.min^{-1}$)	18.
Courant crête (A)	370.
Courant base (A)	70.
Temps de pulsation (ms)	2.
Fréquence pulsation (Hz)	115.

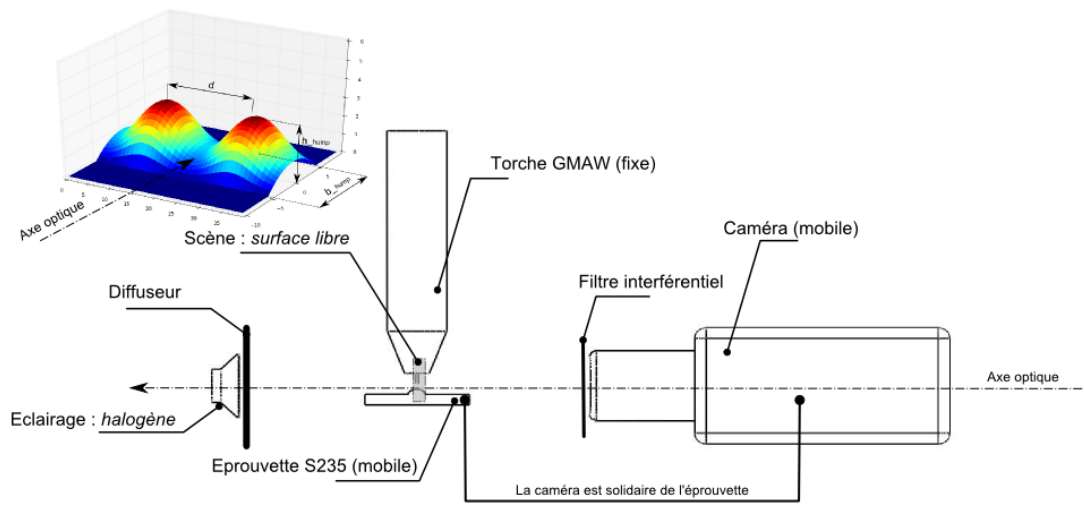


FIGURE 6.10 – Dispositif expérimental pour l'analyse dimensionnelle d'un hump

6.4.2 Résultats : apparition et évolution d'un hump

La figure 6.12 montre les différents profils extraits pour la croissance d'un hump. La torche se déplace de droite à gauche. Le point d'accroche du hump se situe à une position repérée 16.4 mm (selon le champ de vision de la caméra, dans la direction longitudinale du bain de fusion). Ce point correspond à la position de la précédente "valley". La hauteur de cette "valley" peut être estimée : $h_{valley} = 0.8$ mm. La croissance de la hauteur du hump débute à la position 14 mm. La formation du hump se poursuit suivant le sens du soudage.

La figure 6.13 présente l'évolution de la surface libre du bain de fusion : hauteur du profil longitudinal du cordon de soudure en fonction du temps. A la position 16 mm, la hauteur ne varie quasiment pas durant la formation du hump. Il s'agit en effet de la position de la précédente valley. La croissance du hump s'effectue en amont de cette zone "immobile", à partir de la zone autour de 14 mm. Le front avant du hump avance de façon très régulière (sa position évolue linéairement avec le temps) avec une vitesse moyenne de $3.10^{-2} m.s^{-1}$. La vitesse d'avance toujours suivant x de la hauteur crête du hump est de l'ordre de $2.10^{-2} m.s^{-1}$. Le temps de formation d'un hump pour cet essai est de l'ordre de 40 ms. Certaines irrégularités indiquent

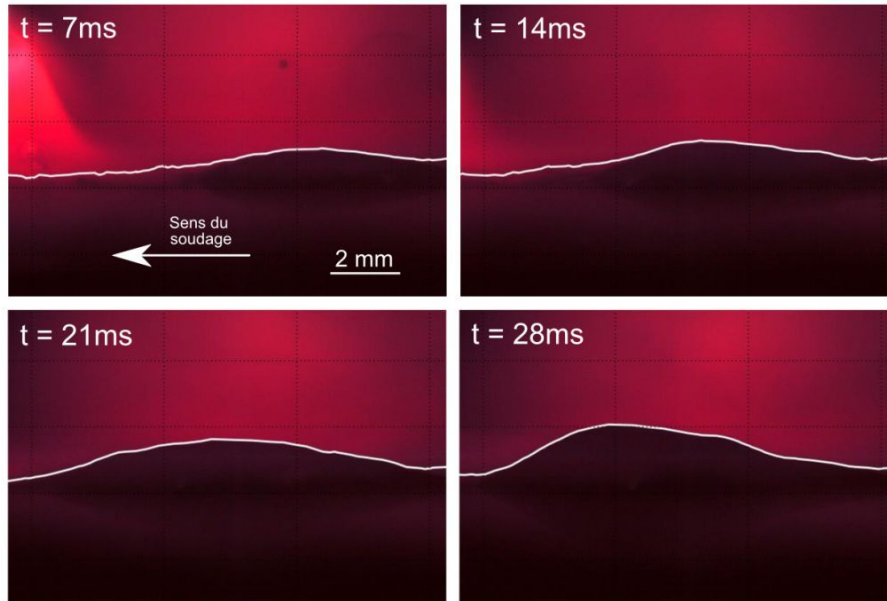


FIGURE 6.11 – Images acquises pour l'évolution d'un hump avec les profils détectés

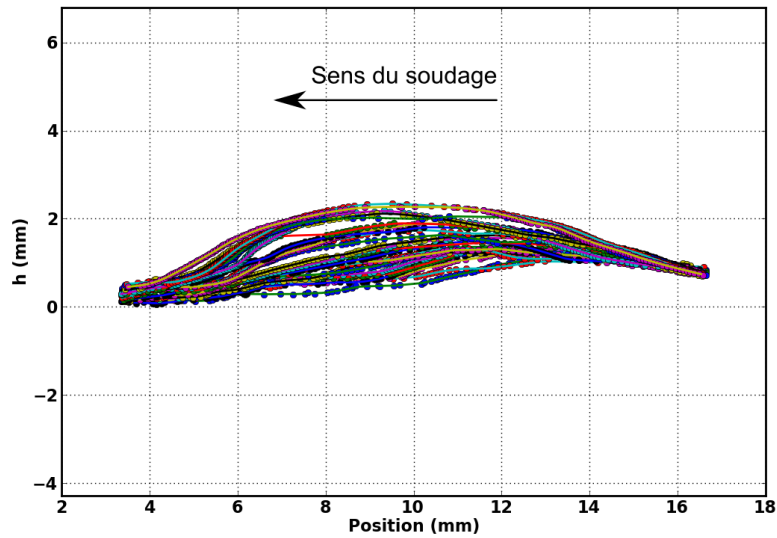


FIGURE 6.12 – Profils détectés par `erHumpAnalysis`

des mouvements fluides sur la hauteur et suivant l'axe longitudinal (axe x). Ces oscillations pourraient traduire les mouvements de convection décrit par Nguyen et al. [26] (figure 6.3).

Suivant la droite "Hmax hump" (cf. figure 6.13), la hauteur du hump évolue en deux phases : une première phase (jusqu'à $t = 0.25s$) de croissance douce suivie d'une seconde plus rapide.

6.5 Discussions

Dans cette section, une analyse possibles des causes liées à l'apparition du défaut (l'instabilité) et celles du régime établi est proposée.

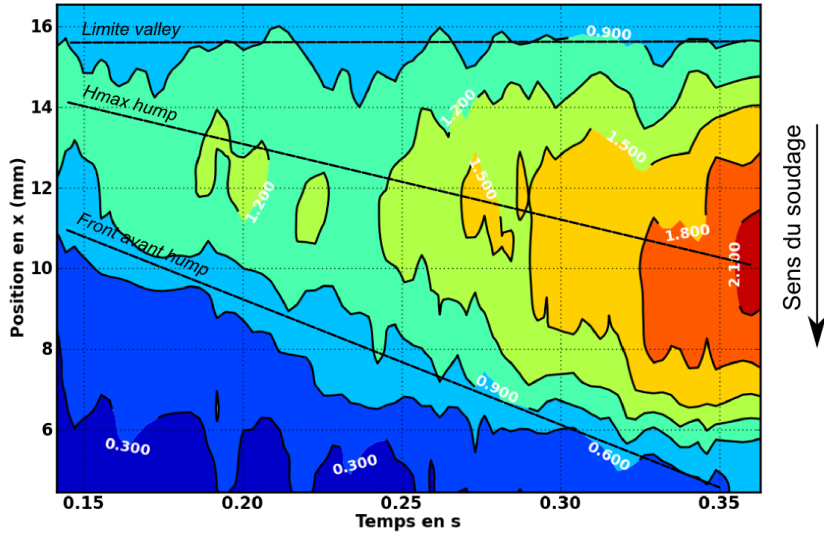


FIGURE 6.13 – Evolution de la position de la surface libre (en x et y) d'un hump en fonction du temps (en construction 2D)

6.5.1 Phase d'apparition du phénomène de humping

La quantité de mouvement due au transfert métallique, la pression de l'arc et le déplacement de la torche induisent une circulation du métal en fusion vers l'arrière du bain. L'arc électrique ne couvre pas intégralement le bain de fusion, la vitesse de solidification est inférieure à la vitesse fluide. Au niveau de ce bain de fusion, les paramètres procédé, la vitesse de soudage V_s et la vitesse fil V_{fil} , conduisent à un temps d'exposition sous l'arc et à une énergie délivrée pour un volume de matière du substrat ($V_{Substrat}$).

Le nombre de Froude (Eq.6.1) peut être utilisé pour caractériser le type d'écoulement. Ce nombre adimensionnel traduit l'importance relative des forces liées à la vitesse et à la force de pesanteur dans les écoulements à surface libre [154] :

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (6.1)$$

avec :

- u est la vitesse du fluide ;
- h la hauteur de la surface libre.

L'étude de la macro-goutte (section 5.3.1.2) donne une vitesse moyenne des gouttelettes en vol libre $U_a = 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ pour une vitesse fil de 6 m.min^{-1} en mode pulsé. La vitesse de soudage étant très petite vis-à-vis de celle de la gouttelette (section 6.4), u peut être estimée $\approx U_a$, la hauteur de bain h étant par ailleurs égale à 0.8 mm (section 6.4.2), le nombre de Froude est $Fr > 1$. Ce résultat indique que le régime du bain de fusion vers l'arrière du bain est de type torrentiel. A la figure 6.14, ce type d'écoulement correspond au cas II [163].

Si le temps caractéristique pour la fusion de $V_{Substrat}$ n'est pas atteint alors il peut apparaître une zone sèche au niveau de l'écoulement de métal liquide. Le métal en fusion circule sur la zone sèche, une striction apparaît suivie d'un ressaut hydraulique. Le temps de solidification de ce petit volume de métal liquide est court (section 5.3.1.3). Pour l'estimer, il est intéressant de se rappeler du temps de solidification obtenu pour la macro-goutte pour des conditions opératoires proches (de l'ordre de la seconde). Ainsi, l'ordre de grandeur du temps de solidification supposé pour la veine de métal liquide peut être estimée à quelques millisecondes, conduisant ainsi à la

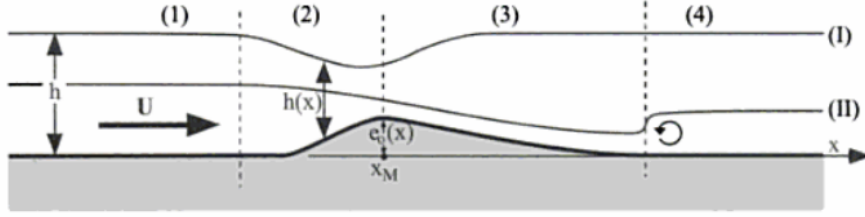


FIGURE 6.14 – Cas II illustrant l'apparition d'une "valley" suite à un manque de fusion localisé du substrat [163]

formation de la première "valley". La recirculation du métal liquide vers le bain de fusion ne peut plus se faire.

6.5.2 Régime établi du phénomène de humping

L'évolution du volume du hump est gouvernée par des aspects thermiques et de mécanique des fluides.

1. Le métal en fusion s'accumule sur la "valley" solidifiée. La hauteur de la veine liquide va croître localement (section 6.4.2). De cette manière, on observe de nouveau un ressaut hydraulique, qui traduit la transition entre un régime de type torrentiel en amont et de type fluvial à l'arrière du bain de fusion. La position du ressaut hydraulique pour le régime établi peut être estimée avec les résultats de l'expérience dimensionnelle. Un nombre de Froude = 1 traduit cette transition entre les deux modes d'écoulement. L'équation 6.1 montre que ce nombre adimensionnel nécessite comme entrées la vitesse du fluide et la hauteur du canal. Pour le calculer, il est d'abord nécessaire d'estimer l'évolution de la vitesse du métal en fusion de la source vers l'arrière du bain suivant une direction longitudinale de la soudure. La section apparente du canal correspond à un demi-disque, avec pour hypothèse que l'évolution de son rayon est égale à celle de $h(x)$ mesurée lors de l'expérience dimensionnelle (section 6.4.2). La conservation du débit le long de la veine liquide, en supposant le liquide incompressible avec un écoulement unidirectionnel, permet de déterminer la vitesse moyenne du liquide à travers cette section (eq.6.2).

$$u(h) = \frac{V_{fil}}{2} \left(\frac{d_{fil}}{h} \right)^2 - v_{soudage} \quad (6.2)$$

Cette vitesse relative du métal liquide par rapport à la tôle de base prend en compte la vitesse fil, le diamètre fil et la vitesse de soudage.

La figure 6.15 présente l'évolution de vitesse fluide u suivant la hauteur du canal.

Le calcul du nombre de Froude en fonction de la hauteur de la veine liquide est illustré à la figure 6.16.

L'abscisse correspondant au point d'intersection de la droite $Fr = 1$ et la courbe $Fr(h)$, indique pour quelle hauteur du bain de fusion le ressaut hydraulique apparaît. Sur la figure 6.13, $h = 0.8 \text{ mm}$ correspond la position de 12 mm suivant la direction longitudinale de la soudure et vers l'arrière du bain de fusion. Le front de solidification évolue de la base vers le sommet du hump et aussi vers l'arc électrique (figure 6.3). La figure 6.17 présente une illustration de cette première phase du régime établi.

2. Suite à ce ressaut et à l'évolution du front de solidification, le hump grossit en hauteur mais aussi en longueur vers la source de chaleur (effet d'accumulation), jusqu'à l'apparition d'une instabilité de Rayleigh gouvernée par les tensions de surface. En effet, la croissance du rayon de courbure du hump due à la variation de la mouillabilité du hump (section

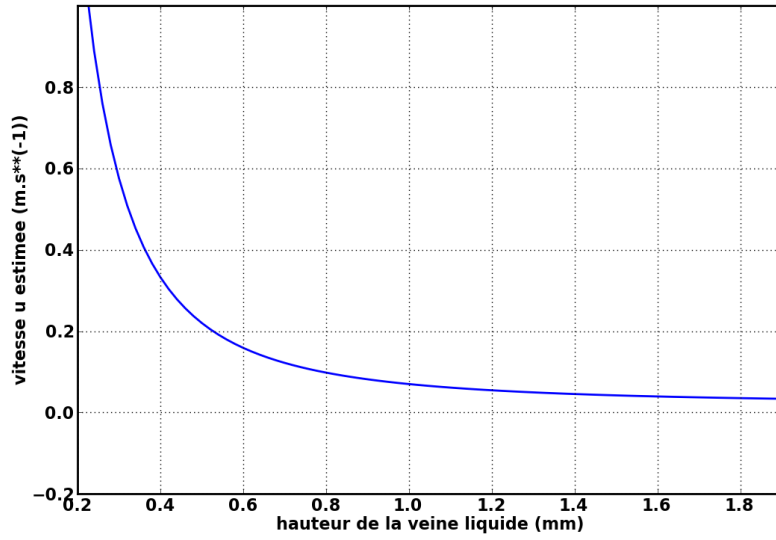


FIGURE 6.15 – Evolution de la variation de la vitesse fluide suivant la hauteur de la veine liquide

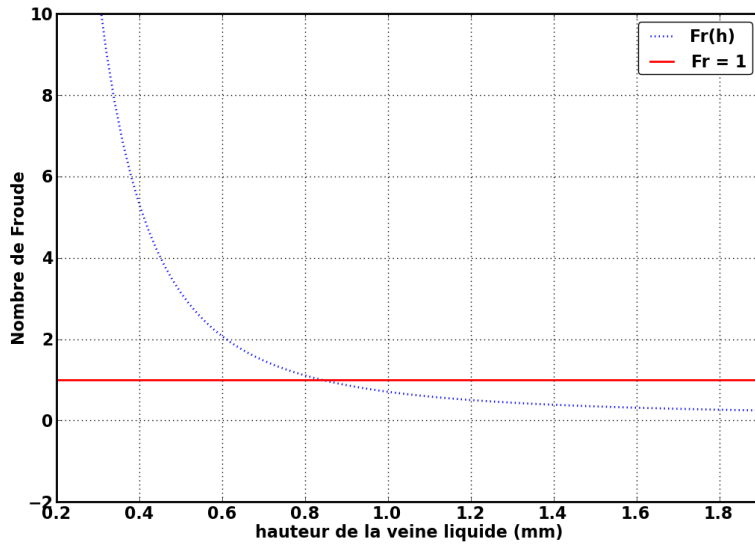


FIGURE 6.16 – Evolution du nombre de Froude (Fr) en fonction de la hauteur de la veine liquide

transversale) pour des angles de mouillage $\theta > \pi/2$ associé à la croissance continue de la hauteur vont induire une diminution de la pression du fluide [152]. Ce δp va provoquer un effet de pompage du bain de fusion de l'avant vers l'arrière [151].

A la figure 6.18, deux types de géométrie du bain de fusion en coupe transversale sont présentés. En fonction de ces géométries, il est possible de caractériser l'évolution de la pression dans le fluide. Dans le cas du humping en GMAW, la base de la soudure est constante (cf. section 6.3.2). Le rayon de courbure R est fonction de la hauteur h et les angles de mouillages θ (Eq.6.3 et figure 6.18).

$$R = h / (1 - \cos(\theta)) \quad (6.3)$$

La pression interne p est décrite par la relation Eq.6.4 avec γ la tension de surface et R'

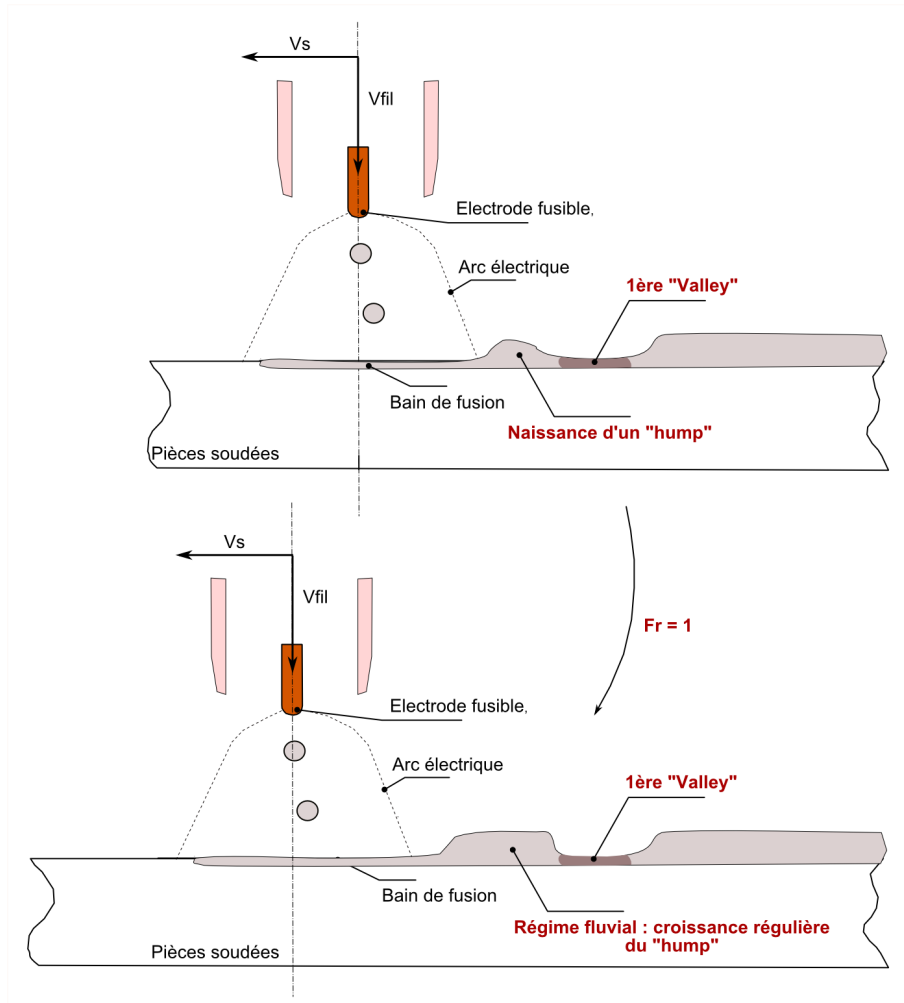


FIGURE 6.17 – Illustration du ressaut hydraulique pour la phase 1 du phénomène de humping en régime établi

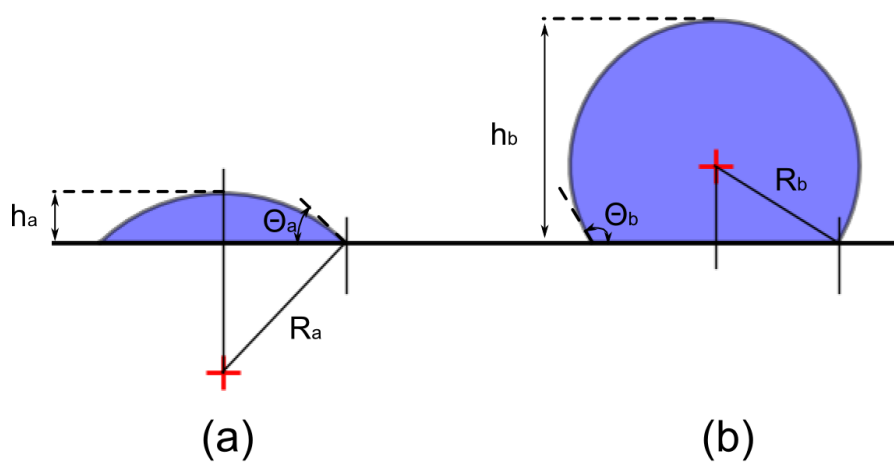


FIGURE 6.18 – sections du bain de fusion pour $\theta < \pi/2$ (a) et $\theta > \pi/2$ (b)

le rayon de courbure longitudinal du bain de fusion. Pour la suite des calculs, $1/R'$ n'est pas pris en compte.

$$p = \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) \quad (6.4)$$

Pour $\theta < \pi/2$, lorsque la hauteur h et θ augmente la pression interne augmente (figure 6.19a). De cette manière, le métal circule des zones à haute pression vers celles à basse pression. Les instabilités hydrodynamiques sont alors atténuées. Pour $\theta > \pi/2$, l'effet s'inverse. La pression tend à augmenter, donc à accentuer l'instabilité hydrodynamique (figure 6.19b).

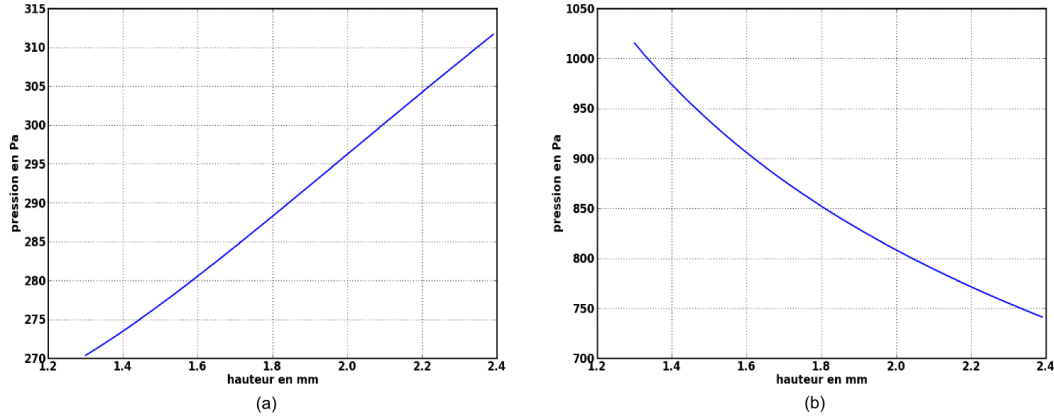


FIGURE 6.19 – Evolution de la pression interne du hump (a) pour $\theta < \pi/2$ et (b) $\theta > \pi/2$ en fonction de h

Il semblerait que dans le cadre des opérations de soudage à l'arc, une condition pour qu'il y ait humping soit un mauvais mouillage du bain de fusion. Les résultats de l'étude de la macro-goutte montrent que plus le gaz est actif ($\nearrow \% CO_2$) plus les angles de mouillages apparents sont petits. Le pré-chauffage de la cible améliore également le mouillage du bain de fusion (section 5.3.2.6). Bradstreet [146] montre l'effet des gaz actifs et Choi [164] celui du préchauffage de l'éprouvette pour repousser le domaine d'apparition du phénomène de humping. Ces résultats étayent l'hypothèse qu'un bon mouillage tend à stabiliser l'hydrodynamique du bain de fusion. Le pré-chauffage devrait aussi avoir pour effet d'éviter l'apparition de zones sèches (section 6.5.1).

3. Enfin, la dernière étape du régime établi vient à la suite de la diminution de pression interne à l'arrière du hump. Il apparaît une nouvelle striction de la veine liquide, qui après solidification deviendra une nouvelle valley. En conséquence, le hump n'est plus alimenté mais reste un temps en fusion alors qu'un nouveau hump fait son apparition un peu plus en amont vers la source.

6.6 Conclusion

Quelques pistes de réflexion ont été proposées pour la compréhension des mécanismes impliqués dans l'apparition du phénomène de humping. L'apparition de cette instabilité est attribuée à un manque de fusion localisé. Cette zone sèche pourrait être à l'origine en soudage à l'arc de l'instabilité hydrodynamique. Il en résulte l'apparition de la première valley suivie d'un amas de matière qui va par la suite conduire à l'établissement du phénomène de humping tout au long du cordon. La formation d'un hump semble se dérouler en trois étapes :

1. Ressaut hydraulique dû à la valley solidifiée qui va induire une variation de la hauteur à l'arrière du bain de fusion ;
2. Instabilité de Rayleigh, angles de mouillages supérieurs à $\pi/2$ d'où une diminution de la pression interne du hump avec une modification de l'écoulement de l'avant vers l'arrière du bain ;
3. Striction et solidification d'une nouvelle valley.

Cette proposition s'appuie sur une approche originale et les premières conclusions de l'étude du comportement dynamique d'un bain de fusion stationnaire en GMAW pulsé (Chapitre 5). Il est important de rappeler que ce dernier chapitre constitue un ensemble de perspectives pour l'étude d'une instabilité en Soudage Grande Vitesse pour les procédés à l'arc.

L'approfondissement de cette étude nécessite encore quelques expériences. Il s'agirait d'abord en cours de soudage d'augmenter la vitesse d'avance du procédé progressivement, afin d'étudier plus finement la transition entre le régime stable et instable. Aussi, pour illustrer l'effet du mouillage sur le domaine d'apparition du humping, des expériences avec différents gaz actifs pourraient être menées.

Conclusion

Contributions

L'objectif initial de ce travail était la mise au point d'une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc. Pour y parvenir, des outils expérimentaux (plateforme expérimentale, cf chapitre 2) et numériques (BAME et erCv, cf chapitre 3) ont été développés afin d'accéder à différentes grandeurs physiques en cours de soudage avec les procédés GTAW & GMAW. Ensuite, quelques problématiques rencontrées avec les applications soudées à l'arc ont été abordées, en particulier celle de la productivité et de la qualité, dans les buts d'améliorer la compréhension des mécanismes physiques induits, d'enrichir la simulation numérique et de trouver des solutions originales pour le monitoring. Afin d'illustrer chacun de ces objectifs, diverses applications ont été présentées comme l'étude du comportement du bain de fusion stationnaire, l'étude des distorsions d'un assemblage soudé et celle de l'acoustique pour le contrôle du procédé P-GMAW. Enfin, une analyse expérimentale du phénomène de humping en soudage à grande vitesse en P-GMAW a été proposée. Les principaux résultats sont résumés ci-dessous.

Mesures d'effort sur des éprouvettes minces en GTAW : Un dispositif d'étude des distorsions au sens large a été développé (cf. chapitre 4). Ce dispositif permet de quantifier l'influence du bridage par la mesure des actions de liaisons. Les résultats ont permis de mettre en évidence les conditions qui doivent exister pour comparer de manière systématique simulation et expérimentation en soudage, comme avec Paraview[®] pour comparer données expérimentales et simulation numérique en terme de géométrie du bain de fusion (cf. figure 3).

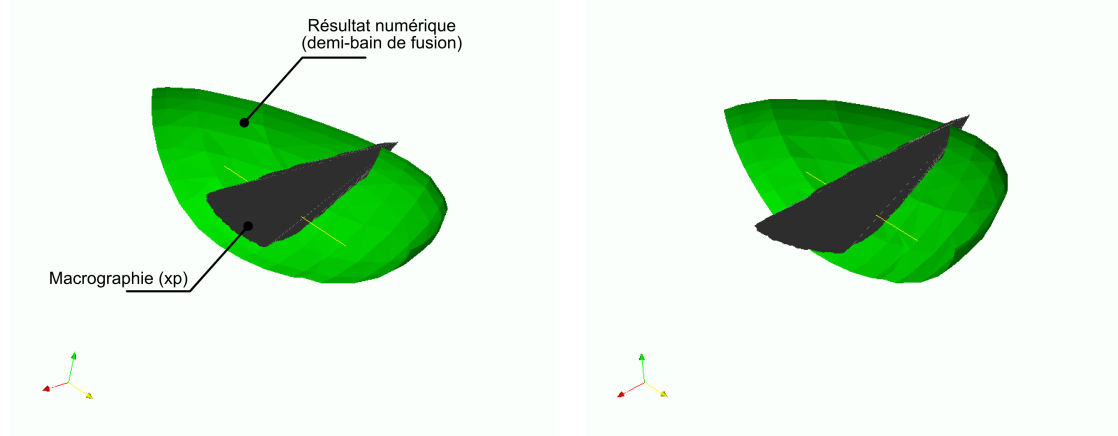


FIGURE 3 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques du bain de fusion pour un soudage en courant lisse et 70 A

Le signal acoustique pour le contrôle du procédé P-GMAW : Les résultats obtenus démontrent la faisabilité de l'acquisition du signal acoustique en vue de contrôler le bon fonctionnement du procédé P-GMAW (cf. chapitre 4). Les résultats présentés ne permettent pas encore de détecter la nature précise du défaut de soudage (tension, court circuit, absence gaz de protection ...). L'intérêt de cette approche pour l'exploration de nouvelles solutions de monitoring des procédés à l'arc a été montré.

Comportement du bain de fusion en P-GMAW : L'étude de la formation et de l'évolution d'une macro-goutte de métal liquide en situation de soudage GMAW pulsé a été possible grâce aux outils développés (cf. figure 4). Les résultats montrent la pertinence de ce type d'approche et la

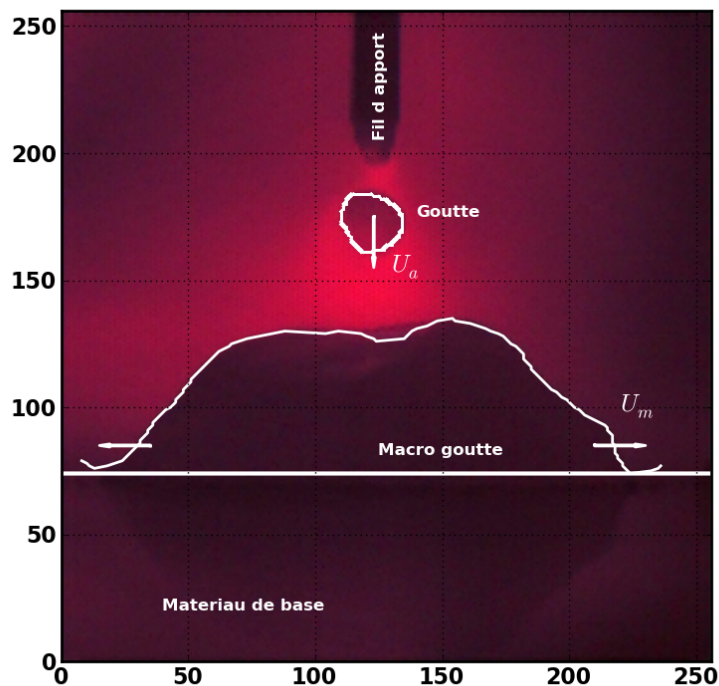


FIGURE 4 – Description image macro-goutte en cours de soudage

possibilité d'accéder à différents paramètres caractéristiques qui peuvent évoluer rapidement au cours du soudage (cf. chapitre 5). Il a ainsi été possible de caractériser la forme de la macro-goutte, son évolution et l'existence de deux phases distinctes (création et croissance à régime établi) quel que soit le paramètre variable au cours des essais. Une première étude aux dimensions a aussi permis de montrer l'importance de l'apport énergétique, de la tension de surface et de la gravité dans la caractérisation de la macro-goutte. Ce type d'approche devrait permettre d'enrichir la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu et de proposer ultérieurement des modèles simplifiés d'analyse ou de sensibilité.

Instabilités en Soudage Grande Vitesse en P-GMAW : Quelques pistes ont été proposées pour la compréhension des mécanismes mis en jeu lors de l'apparition du phénomène de humping (cf. chapitre 6). L'apparition de cette instabilité est attribuée à un manque de fusion localisé. Cette zone sèche pourrait être à l'origine en soudage à l'arc de l'instabilité hydrodynamique. Il en résulte l'apparition de la première valley suivi d'un amas de matière. Aussi, la largeur du bain de fusion est un paramètre constant. Le régime établi semble évoluer en trois phases : d'abord

une instabilité hydrodynamique due à une valley solidifiée, ensuite une instabilité de Rayleigh pilotée par les tensions superficielles et enfin une nouvelle striction du bain de fusion due à la chute de pression interne du hump (angles de mouillages supérieurs à $\pi/2$).

Perspectives

A l'issue de ce travail, on peut dégager les perspectives suivantes :

L'approche expérimentale : Les outils présentés comme la plateforme expérimentale et les bibliothèques BAME et erCv sont évolutifs. D'abord parce que les moyens de mesures comme les caméras rapides évoluent constamment, ce qui permet d'observer des phénomènes très dynamiques, et ce de manière fine. D'autre part, l'amélioration en termes de sensibilité et de dynamique des capteurs CMOS dans le proche infra-rouge est très intéressante pour les dispositifs optiques par réflexion spéculaire. L'avantage serait un gain considérable pour les fréquences d'échantillonnages qui sont liées à la diminution des temps d'exposition. Ensuite, les technologies NIR (cf. chapitre 2) autorisent une utilisation couplée avec un modèle radiométrique pour la thermographie. Malgré la présence de l'arc électrique, la thermographie a sa place pour l'étude des applications soudées. Par l'acquisition des champs de températures du bain de fusion lors de la solidification, ou l'arrière du bain de fusion et la face envers pour les tôles minces en cours de soudage. On comprend l'intérêt de telles mesures de champs pour les problématiques procédés comme celle du humping en Soudage Grande Vitesse.

L'étude Macro-goutte : D'un point de vue académique, le dépouillement des données à une échelle plus fine, ainsi que de nombreux essais en courant lisse de refusion afin de s'affranchir des effets dynamiques dus à la pulsation du courant, sont à envisager. Les essais proposés dans le chapitre 5 se situent pour des configurations très classiques. En effet, le contexte opératoire réduit l'étude au mode de transfert par pulsation du courant. Or, la détection automatisée de la surface libre et des contours de la matière transférée, synchronisée avec les paramètres procédé comme l'intensité, la tension et la vitesse de dévidage du fil d'apport pour plusieurs secondes de soudage sont une source d'informations qualitatives et quantitatives conséquente pour les procédés MIG-MAG. Ainsi, il est possible de connaître de manière statistique l'effet du retrait du fil avec le procédé CMT[®] ou du pinch effect sur la rupture du pont liquide en régime par court-circuit, de l'influence des éléments d'addition dans le gaz de protection sur la stabilité des transferts, la géométrie des gouttes, leurs trajectoires, le taux de projections, le mouillage du bain de fusion, les temps de solidification de la zone fondue, l'influence du régime du courant sur le comportement de la surface libre, etc. On sait par exemple que la mouillabilité est un paramètre important sur la tenue mécanique d'un assemblage soudé. Les outils mis en place pourraient être également le support pour le développement de monitoring notamment par le suivi des trajectoires des gouttelettes. Les quantités géométriques (R_m , U_m , etc.) pourraient alimenter la simulation numérique. Toutes ces informations potentiellement disponibles avec les outils développés durant ce travail semblent intéressantes à la fois pour l'élaboration d'argumentaires sur les effets des gaz de protections, des métaux d'apport et donc aussi pour l'optimisation du procédé.

Le Soudage Grande Vitesse : L'apparition du premier hump est dû à un phénomène d'instabilité hydrodynamique partiellement compris. Afin d'approfondir la compréhension de ce phénomène, de nouvelles expériences sont à envisager, notamment celle pour l'observation de la transition avant-après le humping (variation de la vitesse de déplacement) puis une seconde pour quantifier l'effet des tensions superficielles du bain de fusion (ou le mouillage) avec différents taux de CO_2 dans le gaz de protection. Aussi, le dernier essai proposé paraît être une piste sérieuse pour un gain de productivité en soudage MAG.

Bibliographie

- [1] T. DEBROY : Physical processes in fusion welding. *Reviews of modern physics*, 67(1):85–112, 1995.
- [2] R. BLONDEAU : *Métallurgie et mécanique du soudage*. Hermes Science Publications, 2001.
- [3] R.W. MESSLER : *Principles of welding : processes, physics, chemistry and metallurgy*. Wiley-VCH, 2004.
- [4] Y.M. ZHANG, R. KOVACEVIC et L. LI : Characterization and real-time measurement of geometrical appearance of the weld pool. *Int. J. Mach. Tools Manufact*, 36(7):799–816, 1995.
- [5] Y.S. KIM : *Metal transfer in Gas Metal Arc Welding*. Thèse de doctorat, Massachusetts institute of technology, 1989.
- [6] E.J. SODERSTROM et P.F. MENDEZ : Metal transfer during gmaw with thin electrodes and ar-co2 shielding gas mixtures. *Welding Journal*, pages 124–132, 2008.
- [7] M.S. WEGLOWSKI : Investigation on the arc light spectrum in gta welding. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20:519–522, 2007.
- [8] L. DEPRADEUX : *Simulation numérique du soudage Acier 316L*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2004.
- [9] J. CHAPUIS, C. BORDREUIL, F. SOULIÉ, G. FRAS et Y. El KAÏM : Forces measurement during gas tungsten arc welding. To be published.
- [10] J. CHAPUIS, C. BORDREUIL, F. SOULIÉ et G. FRAS : Analyse expérimentale de distorsions induites en soudage. *In 19ème congrès Français de Mécanique*, Marseille (13000), France, 2009.
- [11] J. CHAPUIS, E. ROMERO, C. BORDREUIL, F. SOULIÉ et G. FRAS : Dynamic behaviour of the weld pool in stationary gmaw. *In 63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding*, 2010.
- [12] J. CHAPUIS, F. SOULIÉ, C. BORDREUIL et G. FRAS : Comportement d’une macro-goutte stationnaire en gmaw pulsé. *In MATERIAUX 2010, 8eme Journées Nationales du Soudage*, 2010.
- [13] T.W. EAGAR : Welding and joining : moving from art to science. *Welding journal*, pages 49–55, June 1995.
- [14] J.F. LANCASTER : The physics of welding. *Phys. Technol*, 15:73–79, 1984.
- [15] T.W. EAGAR : The physics of welding processes. *In 5th JWS international Symposium*, volume 1, pages 11–16, Tokyo, April 1990. JWS.

- [16] *Les procédés de soudage à l'arc : les soudages TIG, MIG et MAG*, chapitre 2. Généralités physiques sur l'arc électrique sous protection gazeuse, pages 13–14. Air Liquide Welding, 2004.
- [17] Y. HIRATA : Pulsed arc welding. *Welding international*, 17(2):98–115, 2003.
- [18] <http://www.fronius.com>.
- [19] <http://www.millerwelds.com>.
- [20] <http://www.lincolnelectric.fr>.
- [21] J. CHAPUIS, T. OPDERBECKE et J.M. FORTAIN : Compréhension et évaluation d'un poste de soudage mig-mag " pinch effect ". Mémoire de D.E.A., Polytech'Montpellier - Air Liquide Welding (CTAS), 2007.
- [22] *Les procédés de soudage à l'arc : les soudages TIG, MIG et MAG*, chapitre 3. Le soudage TIG, pages 19–39. Air Liquide Welding, 2004.
- [23] G. SIERRA : *Etude métallurgique et mécanique de l'assemblage hétérogène Acier/Aluminium par les procédés LASER et TIG*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, 2006.
- [24] *Les procédés de soudage à l'arc : les soudages TIG, MIG et MAG*, chapitre 4. Le soudage MIG et MAG, pages 45–83. Air Liquide Welding, 2004.
- [25] P. MACQUET : Soudage mag en construction métallique : fil plein ou fil fourré? *Revue construction métallique*, (1):63–69, 1999.
- [26] T.C. NGUYEN, D.C. WECKMAN et D.A. JOHNSON : Predicting onset of high speed gas metal arc weld bead defects using dimensional analysis techniques. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(7):634–648, 2007.
- [27] Y.S. KIM et T.W. EAGAR : Metal transfer in pulsed gas metal arc welding. *Welding Journal*, pages 279–287, July 1993.
- [28] S. SUBRAMANIAM, D.R. WHITE, J.E. JONES et D.W. LYONS : Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed gmaw. *Welding Journal*, pages 166–172, 1999.
- [29] J. CHAPUIS, E. ROMERO, C. BORDREUIL, F. SOULIÉ et G. FRAS : Bame library : Data structures and analysis of multi-physics data acquisitions for welding. Soumis en Juin 2010, To be published.
- [30] J. BINARD et A. CHABENAT : Etude expérimentale des paramètres influençant le bain de fusion. *Soudage et Techniques Connexes*, pages 20–35, Janvier-Février 1985.
- [31] D.M. EVANS, D. HUANG, J.C. MCCLURE et A.C. NUNES : Arc efficiency of plasma arc welding. *Welding Journal*, pages 53–58, February 1998.
- [32] M. BROCHARD : *Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, 2009.
- [33] R.W. NILES et C.E. JACKSON : Weld thermal efficiency of the gtaw process. *Welding Journal*, pages 25–32, January 1975.
- [34] Y. ZHANG : *Real-Time weld process monitoring*. CRC Press, 2008.

- [35] H. FAN, N.K. RAVALA, H.C. WIKLE et B.A. CHIN : Low-cost infrared sensing system for monitoring the welding process in the presence of plate inclination angle. *Journal of materials processing technology*, 140:668–675, 2003.
- [36] S.C.A. ALFARO, D.S. MENDONÇA et M.S. MATOS : Emission spectrometry evaluation in arc welding monitoring system. *Journal of Materials Processing Technology*, 179:219–224, 2006.
- [37] S.C.A. ALFARO et P. DREWS : Intelligent systems for welding process automation. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, XXVIII(1):25–29, 2006.
- [38] Baruch KARP : Health monitoring of joints using dynamic end effects. *Journal of Sound and Vibration*, 312:257–272, 2007.
- [39] <http://www.hks-pc.de>.
- [40] <http://www.impactwelding.com>.
- [41] T. W. EAGAR : Physics of arc welding. In *Conf. Physics in the Steel industry*, volume 84, pages 272–285, Bethlehem, 5-7 October 1982.
- [42] T. C. CHOO : *Mathematical Modelling of Heat and Fluid Flow Phenomena in A Mutually Coupled Welding Arc and Weld Pool*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [43] J. HU, H. GUO et H.L. TSAI : Weld pool dynamics and the formation of ripples in 3d gas metal arc welding. *International Journal of HEAT and MASS TRANSFER*, 51:2537–2552, 2008.
- [44] M. TANAKA, H. TERASAKI, M. USHIO et J.J. LOWKE : A unified numerical modeling of stationary tungsten-inert-gas welding process. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(7):2043–2052, 2002.
- [45] G.M. OREPER, T.W. EAGAR et J. SZEKELY : Convection in arc weld pools. *Welding Journal*, pages 307–312, November 1983.
- [46] J.M. BAUCHIRE, J.J. GONZALEZ et A. GLEIZES : Modeling of a dc plasma torch in laminar and turbulent flow. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 17:409–432, 1997.
- [47] J. HU et H.L. TSAI : Heat and mass transfer in gas metal arc welding. part 1 : The arc. *International Journal of HEAT and MASS TRANSFER*, 50:833–846, 2007.
- [48] J. MIRAPEIX, A. COBO, O.M. CONDE, C. JAÚREGUI et AL. : Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis. *NDT&E International*, 39:356360, 2005.
- [49] M.L. LIN et T.W. EAGAR : Influence of surface depression and convection on arc weld pool geometry. *The American society of mechanical engineers*, 10:63–69, 1984.
- [50] M.L. LIN et T.W. EAGAR : Influence of arc pressure on weld pool geometry. *Welding Journal*, pages 163–169, June 1985.
- [51] M.L. LIN et T.W. EAGAR : Effects of surface depression and convection in gta welding. *Advances in Welding Science and Technology*, pages 47–51, 1986.
- [52] P.F. MENDEZ et T.W. EAGAR : Magnitude scaling of free surface depression during high current arc welding. In J. M. Vitek et AL, éditeur : *5th International Conference Trends in Welding Research*, pages 13–18, 1998.

- [53] M.L. LIN et T.W. EAGAR : Pressures produced by gas tungsten arcs. *Metallurgical transactions*, 17B:601–607, 1986.
- [54] C.D. SORENSEN et T.W. EAGAR : Digital signal processing as a diagnostic tool for gas tungsten arc welding. *Advances in Welding Science and Technology*, pages 467–472, 1986.
- [55] R. J. RENWICK et R.W. RICHARDSON : Experimental investigation of gta weld pool oscillations : A stationary molten gta weld pool is observed to oscillate at a natural frequency which is dependent on pool geometry. *Welding Journal*, pages 29–35, February 1983.
- [56] K.C. HSU, K. ETEMADI et E. PFENDER : Study of the free-burning high-intensity argon arc. *Journal of Applied Physics*, 54:1293–1301, 1982.
- [57] J.J. LOWKE : Simple theory of free-burning arcs. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 12:1873–1886, 1979.
- [58] M. TANAKA et J.J. LOWKE : Predictions of weld pool profiles using plasma physics. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 40:R1R23, 2007.
- [59] Y.C. LIM, D.F. FARSON, M.H. CHO et J.H. CHO : Stationary gmaw-p weld metal deposit spreading. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14:626–635, 2009.
- [60] E. FU, P. CONWAY et K. WILLIAMS : Droplet weld wp6 welding physics : Model : droplet formation and impact. Rapport technique, Loughborough University, 2001.
- [61] M.H. CHO, Y.C. LIM et D.F. FARSON : Simulation of weld pool dynamics in the stationary pulsed gas metal arc welding process and final weld shape. *Welding Journal*, pages 271–283, December 2006.
- [62] S. NORDBRUCH, P. TSCHIRNER et A. GRÄSER : Visual online monitoring of pgmaw without a lighting unit. Rapport technique, University Bremen, Institute of automation, Germany, 2001.
- [63] J.P. PLANCKAERT : *Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2008.
- [64] K. YAMAZAKI, E. YAMAMOTO, K. SUZUKI, F. KOCHIICHI, K. HONO, S. TASHIRO, M. TANAKA et K. NAKATA : In-situ measurement of metal droplet temperature in gas metal arc welding by two-color pyrometry. *In IIW Doc. 212-1103-07*, 2007.
- [65] Y.S. KIM et T.W. EAGAR : Analysis of metal transfer in gas metal arc welding. *Welding Journal*, pages 269–277, June 1993.
- [66] L.A. JONES, T.W. EAGAR et J.H. LANG : Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding. *J. Phys, D : Appl. Phys.*, 31:93–106, 1998.
- [67] J. HU et H.L. TSAI : Heat and mass transfer in gas metal arc welding. part 2 : The metal. *International Journal of HEAT and MASS TRANSFER*, 50:808–820, 2007.
- [68] L.A. JONES, T.W. EAGAR et J.H. LANG : Metal transfer control in gas metal arc welding. *In Tenth Symposium on energy engineering sciences*, Argonne (IL), 1992. Argonne National Laboratory.
- [69] K.C. MILLS, B.J. KEENE, R.F. BROOKS et A. SHIRALI : Marangoni effects in welding. *Pil. Trans. R. Soc. Lond.*, 356:911–925, 1998.
- [70] Sindo KOU : *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, Inc., second edition édition, 2003.

- [71] S. KATAYAMA, Y. KAWAHITO et M. MIZUTANI : Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects. *Physics Procedia*, 5:917, 2010.
- [72] C.R. HEIPLE et J.R. ROPER : Mechanism for minor element effect on gta fusion zone geometry. *Welding Journal*, pages 99–102, April 1982.
- [73] K.C. MILLS : Factors affecting variable weld penetration. *International Materials Reviews*, 35:185, 1990.
- [74] A. MATSUNAWA, S. YOKOYA, T. OKADA et Y. ASAKO : Model experiments of weld pool convection and penetration shape in tig arc welding. In *IIW Doc. 212-707-88*, 1988.
- [75] P. BURGARDT et C.R. HEIPLE : Interaction between impurities and welding variables in determining gta weld shape. *Welding Journal*, 65:150–155, 1986.
- [76] R. KOVACEVIC et Y.M. ZHANG : Real-time image processing for monitoring of free weld pool surface. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119:161–169, 1997.
- [77] G. SAEED et Y.M. ZHANG : Weld pool surface depth measurement using a calibrated camera and structured light. *Meas. Sci. Technol.*, 18:25702578, 2007.
- [78] H. SONG et Y. ZHANG : Image processing for measurement of three-dimensional gta weld pool surface. *Welding Journal*, pages 1–17, 2007.
- [79] N.M. CARLSON et J.A. JOHNSON : Ultrasonic sensing of weld pool penetration. *Welding Journal*, pages 239–246, November 1988.
- [80] D.E. HARDT, D.A. GARLOW et J.B. WEINERT : A model of full penetration arc-welding for control system design. *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, 107:40–46, March 1985.
- [81] D.E. HARDT et J.M. KATZ : Ultrasonic measurement of weld penetration. *Welding Journal*, pages 273–281, 1984.
- [82] W.F. SAVAGE, C.D. LUNDIN et A.H. ARONSON : Weld metal solidification mechanics. *Welding Journal*, 44:175s–181s, 1965.
- [83] W. ZHANG, C.-H. KIM et T. DEBROY : Heat and fluid flow in complex joints during gas metal arc welding - part i : Numerical model of fillet welding. *Journal of applied physics*, 95(9):5210–5219, 2004.
- [84] Marc MÉDALE et Marc JAEGER : Modélisation par éléments finis d'écoulements à surface libre avec changement de phase solide-liquide. a finite element thermal analysis of flows with free and moving boundaries. *International Journal of Thermal Sciences*, 38(3):267 – 276, 1999.
- [85] R. KOVACEVIC, Y.M. ZHANG et S. RUAN : Sensing and control of weld pool geometry for automated gta welding. *Journal of Engineering for Industry*, 117:210–220, 1995.
- [86] G.M. ROUX et R. BILLARDON : Identification of thermal boundary conditions and thermo-metallurgical behaviour of x10crmovnb9-1 steel during simple tig welding tests. In *Mathematical modelling of weld phenomena 8*, 2007.
- [87] O.H. NESTOR : Heat intensity and current density distributions at the anode of high current inert gas arcs. *Journal of Applied Physics*, 33(1):1638–1648, 1962.
- [88] N.S. TSAI et T.W. EAGAR : Distribution of the heat and current fluxes in gas tungsten arcs. *Metallurgical Transactions B*, 16B:841–846, 1985.

- [89] H.W. GHENT, D.W. ROBERTS, C.E. HERMAANCE, H.W. KERR et A.B. STRONG : Arc efficiencies in tig welds. *In Arc physics and weld pool behaviour; proceedings of the International Conference*, 1989.
- [90] N.S. TSAI : *Heat distribution and weld bead geometry in arc welding*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1983.
- [91] M. GOODARZI, R. CHOO et J. TOGURI : The effect of the cathode tip angle on the gtaw and weld pool : 1 mathematical model of the arc. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 30:2744–2756, 1997.
- [92] C.R. HEIPLE et J.R. ROPER : *Welding : Theory and practice*. Elsevier Science, 1990.
- [93] P.W. FUERSCHBACH et G.A. KNOROVSKY : A study of melting efficiency in plasma arc and gas tungsten arc welding. *Welding Journal*, pages 287–297, November 1991.
- [94] W.H. GIEDT, L.N. TALLERICO et P.W. FUERSCHBACH : Gta welding efficiency : calorimetric and temperature field measurement. *Welding Journal*, pages 28–32, January 1989.
- [95] J.N. DUPONT et A.R. MARDER : Thermal efficiency of arc welding processes. *Welding Journal*, pages 406–416, December 1995.
- [96] H.B. SMARTT, J.A. STEWART et C.J. EINERSON : Heat transfer in gas tungsten arc welding. *In Proceedings of the ASM International Conference*, 1986.
- [97] M. VURAL, H.F. MUZAFFEROGLU et U.C. TAPICI : The effect of welding fixtures on welding distortions. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20:511–514, January-February 2007.
- [98] R.A. CHIHOSKI : Understanding weld cracking in aluminium sheet. *Welding Journal*, pages 24–30, January 1972.
- [99] C.L. TSAI, M.D. HAN et G.H. JUNG : Investigating the bifurcation phenomenon in plate welding. *Welding Journal*, 85:151–162, 2006.
- [100] L. DEPRADEUX et J.F. JULLIEN : Experimental and numerical simulation of thermo-mechanical phenomena during a tig welding process. *Journal de Physique IV*, 120:697–704, 2004.
- [101] L. JOHNSON : Moiré techniques for measuring strains during welding. *Experimental mechanics*, pages 145–151, April 1974.
- [102] A. MATSUNAWA et T. OHJI : Role of surface tension in fusion welding (part 1). *Transactions of JWRI*, 11(2):145–154, 1982.
- [103] M. H. CHO : *Numerical simulation of arc welding process and its application*. Thèse de doctorat, The Ohio State University, 2006.
- [104] T.D. BURLEIGH et T. W. EAGAR : Measurement of the force exerted by a welding arc. *Metallurgical transactions*, 14A:1223–1224, 1983.
- [105] S. SUBRAMANIAM et D.R. WHITE : Effect of shield gas composition on surface tension of steel droplets in gas-meta-arc welding arcs. *Metallurgical and materials transactions B*, 32B:313–318, April 2001.
- [106] [http ://www.ni.com](http://www.ni.com).

- [107] Field wiring and noise considerations for analog signals. Rapport technique, National Instruments, 2008.
- [108] G. ASCH et COLLABORATEURS : *Acquisition de données, du capteur à l'ordinateur*. 2003.
- [109] Ni-mcal calibration methodology improves measurement accuracy. Rapport technique, National Instruments, 2009.
- [110] Noise control in strain gage measurements. Rapport technique : Tech Note TN-501-2, Vishay, 2007.
- [111] F. ROUSSELIN : Réalisation d'un banc de soudage instrumenté et asservi. Mémoire de D.E.A., INSA LYON, 2006.
- [112] Measuring strain with strain gages. Rapport technique, National Instruments, 2009.
- [113] E.W. KIM, C. ALLEMAND et T.W. EAGAR : Visible light emissions during gas tungsten arc welding and its application to weld image improvement. *Welding Journal*, pages 369–377, December 1987.
- [114] P.J. LI et Y.M. ZHANG : Analysis of an arc light mechanism and its application in sensing of the gtaw process. *Welding Journal*, pages 252–260, Septembre 2000.
- [115] M.S. WEGLOWSKI : Measurement of arc light spectrum in the mag welding method. *Metrology and Measurement Systems*, XVI:143–159, 2009.
- [116] <http://fr.wikipedia.org/wiki/wikip>
- [117] Y. ROTROU : *Thermographie courtes longueurs d'onde avec des caméras silicium : contribution à la modélisation radiométrique*. Thèse de doctorat, L'école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, 2006.
- [118] J.J. ORTEU, Y. ROTROU, T. SENTENAC et L. ROBERT : An innovative method for 3-d shape, strain and temperature full-field measurement using a single type of camera : principle and preliminary results. *Experimental mechanics*, 48:163–179, 2008.
- [119] C.D. ALLEMAND, R. SCHOEDER, D.E. RIES et T.W. EAGAR : A method of filming metal transfer in welding arcs. *Welding Journal*, pages 45–47, January 1985.
- [120] G. SAEED, M. LOU et Y.M. ZHANG : Computation of 3d weld pool surface from the slope field and point tracking of laser beams. *Measurement Science and Technology*, 15:389–403, 2004.
- [121] G. SAEED : Vision-based sensing of the welding process : a survey. *Int. J. Modelling, Identification and Control*, 1(2):84–93, 2006.
- [122] M series synchronization with labview and ni-daqlmx. Rapport technique, National Instruments, 2007.
- [123] O. VIGNAL : Conception et instrumentation d'une plateforme d'essai de soudage à l'arc électrique. Mémoire de D.E.A., Conservatoire National des Arts et Métiers, 2007.
- [124] E. ROMERO, J. CHAPUIS, C. BORDREUIL, F. SOULIÉ et G. FRAS : Edge detection of weld pool, macro drop and metal transfer drop in a gtaw and gmaw process, by a new weld image processing library : ercv*. In *63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding*, 2010.

- [125] J. KERKHOFF, T.W. EAGAR et J. UTTERBACK : A systematic strategy for optimizing manufacturing operations. *Production and Operations Management*, 7:67–85, 1998.
- [126] V. VILLARET, F. DESCHAUX-BEAUME, F. JANUARD, J.-M. FORTAIN, G. FRAS et S. ROUQUETTE : Développement de nouveaux fils fourrés pour le soudage à l’arc d’aciers inoxydables ferritiques destinés à la fabrication des parties chaudes de ligne d’échappement automobile. In *MATERIAUX 2010, 8eme Journées Nationales du Soudage*, 2010.
- [127] P. PRAVEEN, M.J. KANG et P.K.D.V. YARLAGADDA : Arc voltage behavior of one drop per pulse mode in gmaw-p. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 17:389–392, July 2006.
- [128] P. PRAVEEN, M.J. KANG et P.K.D.V. YARLAGADDA : Arc voltage behavior in gmaw-p under different drop transfer modes. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 32:196–202, 2009.
- [129] A. NIEL, C. BORDREUIL, F. DESCHAUX-BEAUME et G. FRAS : Etude et modélisation de la fissuration à chaud en soudage. In *Doctiss 2009*, Montpellier, 2009.
- [130] T.N. NGUYEN et M.A. WAHAB : A theoretical study of the effect of weld geometry parameters on fatigue crack propagation life. *Engineering Fracture Mechanic*, 51(1):1–18, 1995.
- [131] <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>.
- [132] <http://www-lmj.cea.fr/fr/experiences>.
- [133] <http://www.hdfgroup.org>.
- [134] <http://www.python.org>.
- [135] S. ROEREN, C. SCHWENK et M. RETHMEIER : Different approach to model clamping conditions within a welding conditions. In *Mathematical modelling of weld phenomena 8*, pages 1093–1106, Graz, Autriche, Septembre 2006.
- [136] P. MICHALERIS et A. DEBICCARI : Prediction of welding distorsions. *Welding Journal*, pages 172s–181s, April 1997.
- [137] J.A. GOLDAK et M. AKHLAGHI : *Computational welding mechanics*. Springer, 2005.
- [138] X. K. ZHU et Y. J. CHAO : Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation. *Computers & Structures*, 80(11):967 – 976, 2002.
- [139] Y. ARATA, K. INOUE, M. FUTAMATA et T. TOH : Investigation on welding arc sound (report 1) - effect of welding method and welding condition of welding arc sound -. *Transactions of JWRI*, 8:25–31, 1979.
- [140] M.D. DROUET et F. NADEAU : Acoustic measurement of the arc voltage applicable to arc welding and arc furnaces. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 15(3):268–269, 1982.
- [141] H.R. CASTNER et R. SINGH : Pulsed vs. steady current gmaw : Which is louder ? *Welding Journal*, pages 47–51, 1997.
- [142] L. GRAD, J. GRUM, I. POLAJNAR et J.M. SLABE : Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44:555–561, 2004.

- [143] E. Huanca CAYO et S.C. Absi ALFARO : Gmaw process stability evaluation through acoustic emission by time and frequency domain analysis. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 34:157–164, June 2009.
- [144] Kamal PAL, Sandip BHATTACHARYA et Surjya K. PAL : Investigation on arc sound and metal transfer modes for on-line monitoring in pulsed gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(10):1397 – 1410, 2010.
- [145] K. MILLS, E. HONDROS et Z. LI : Interfacial phenomena in high temperature processes. *Journal of Materials Science*, 40:2403–2409, 2005.
- [146] B.J. BRADSTREET : Effect of surface tension and metal flow on weld bead formation. *Welding Journal*, pages 314–322, July 1968.
- [147] R. FABBRO, S. SLIMANI, F. COSTE et F. BRIAND : Analysis of the various melt pool hydrodynamic regimes observed during cw nd-yag deep penetration laser. *In ICALEO 07 international congress*, numéro 802, 2007.
- [148] H.G. FAN et R. KOVACEVIC : Droplet formation, detachment, and impingement on the molten pool in gas metal arc welding. *Metallurgical and materials transactions B*, 30B:791–801, 1999.
- [149] M.H. CHO et D.F. FARSON : Understanding bead hump formation in gas metal arc welding using a numerical simulation. *Metallurgical and materials transactions*, 38B:305–319, 2007.
- [150] S. SCHIAFFINO : *The fundamentals of molten microdrop deposition and solidification*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [151] S. SCHIAFFINO et A.A. SONIN : Formation and stability of liquid and molten beads on a solid surface. *J. Fluid Mech.*, 343:95–110, 1997.
- [152] F. GAO et A.A. SONIN : Precise deposition of molten microdrops : the physics of digital microfabrication. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 444:533–554, 1994.
- [153] X. NOBLIN : *Mouillage et Démouillage Inertiels : Triplons, Flaques vibrées, Ondes de chocs*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2004.
- [154] R.A. GRANGER : *Fluids Mechanics*, chapitre 7.2. Dimensional Analysis, pages 363–377. Dover Publications, 1995.
- [155] M.V. ELSER, F. AL-BENDER et J.-P. KRUTH : Application of dimensional analysis to selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 14(1):15–22, 2008.
- [156] R.L. HOFFMAN : A study of the advancing interface : 1 interface shape in liquid-gas systems. *Journal of colloid and interface science*, 50(2):228–243, 1975.
- [157] R.L. HOFFMAN : A study of the advancing interface : 3 theoretical prediction of the dynamic contact angle in liquid-gas systems. *Journal of Colloid and Interface Science*, 94(2):470–487, 1983.
- [158] W.F. SAVAGE, E.F. NIPPES et K. AGUSA : Effect of arc force on defect formation in gta welding. *Welding Journal*, pages 212–224, July 1979.
- [159] P.F. MENDEZ, K.L. NIECE et T.W. EAGAR : Humping formation in high current gta welding. *In International conference on joining of advanced and speciality materials II*, Cincinnati (OH), USA, November 1999.

- [160] P.F. MENDEZ et T.W. EAGAR : Penetration and defect formation in high-current arc welding. *Welding Journal*, pages 296s–306s, October 2003.
- [161] T.C. NGUYEN, D.C. WECKMAN et D.A. JOHNSON : The discontinuous weld bead defect in high-speed gas metal arc welds. *Welding journal*, 86:360–372, November 2007.
- [162] R. FABBRO : Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 43:445501, 2010.
- [163] E. GUYON, J.-P. HULIN et L. PETIT : *Hydrodynamique physique*. 2001.
- [164] H.W. CHOI, D.F. FARSON et M.H. CHO : Using a hybrid laser plus gmaw process for controlling the bead humping defect. *Welding Journal*, pages 174–179, August 2006.
- [165] [http ://www.lem.com/hq/fr](http://www.lem.com/hq/fr).
- [166] [http ://www.bronkhorst.fr/files/downloads/brochures/folder-el-flow.pdf](http://www.bronkhorst.fr/files/downloads/brochures/folder-el-flow.pdf).

Table des figures

1	Le soudage dans son contexte industriel	9
2	Objectifs et démarche de la thèse	10
1.1	Schéma soudage TIG et les phénomènes physiques mis en jeu [8]	14
1.2	Diagrammes tension et intensité pour un régime de soudage pulsé	16
1.3	Diagrammes tension et intensité pour un régime de soudage alternatif	16
1.4	Diagrammes tension et intensité pour un court-circuit du procédé MIG-MAG STT [©] (Lincoln Electric [©]) [20]	17
1.5	Principe du soudage TIG [23]	18
1.6	Principe du soudage MIG-MAG	20
1.7	Plages de transfert métallique en soudage MIG-MAG [24]	20
1.8	Diagramme tension de soudage et les images du transfert pour une période court circuit [21]	21
1.9	Diagramme intensité/tension de soudage et les images du transfert pour le mode globulaire [21]	21
1.10	Diagramme intensité/tension de soudage et les images du transfert pour le mode spray [21]	22
1.11	Transfert métallique mode veine tournante [26]	22
1.12	Diagramme intensité/tension de soudage et les images du transfert pour une pé- riode pulsée [29]	23
1.13	Images acquises pour une période en fonctionnement Cold Arc [©] [21]	24
1.14	Diagramme intensité/tension/Vitesse fil correspondant aux images présentées à la figure 1.13 [21]	24
1.15	Relation entre la hauteur d'arc (mm) et la tension (V) obtenues par Binard et al. [30] (a) et Evans et al. [31] (b) (figure de [32])	25
1.16	Variation de la tension de l'arc (V) en fonction de l'angle d'affûtage de l'électrode ($^{\circ}$), du gaz utilisé, et de la vitesse de soudage ($mm.min^{-1}$) pour une hauteur d'arc de 2,54 mm, une intensité de 175A et une pièce en acier HY – 80 [33] . . .	26
1.17	Physique de l'arc, du transfert et du bain	27
1.18	Physique de l'arc	29
1.19	Structure de l'arc électrique [16]	30
1.20	Spectre émis avec le procédé GMAW sur une éprouvette en SAE 1020 [36]. (1) Fe I 561.564, (2)Fe II 537.149, (3)Mn I 482.352 et (4)Mn II 403.306	31
1.21	Dispositif expérimental pour mesurer la pression de l'arc [53]	32
1.22	Distributions des lignes de courant (a) et des forces électromagnétique (b) [47] .	33
1.23	Physique du transfert métallique en GMAW	34
1.24	a) image brute du transfert d'une goutte dans un arc MIG, b) image traitée avec détection de la goutte [62]	36
1.25	Détection de contours durant la phase de court circuit [63]	36
1.26	Champ de température d'une gouttelette dans un arc MAG (330A) [64]	36

1.27	Une séquence des distributions de température dans le métal montrant la génération de la gouttelette, le détachement, le transfert dans l'arc, l'impact sur le bain de fusion, et la dynamique du bain de fusion [67]	38
1.28	Physique du bain de fusion	39
1.29	Effets des différentes forces sur les mouvements de convection dans le bain fondu [70]	39
1.30	Images obtenues par Rayons X en LBW en mode Keyhole avec les traceurs pour la caractérisation des cellules de convection [71]	40
1.31	Evolution de l'aire de la section du bain de soudage (mm^2) en fonction du courant (A) d'une pièce en acier HY-80 en GTAW [33]	41
1.32	Evolution du rapport P/L en fonction de la hauteur d'arc (mm) et pour différents aciers en GTAW (chaque symbole représente un acier) [73]	42
1.33	Dispositif expérimental (a) et une image acquise avec détection de contour (b) [76]	43
1.34	Comparaison de la géométrie du bain fondu en fonction du paramètre vitesse de soudage [42]	44
1.35	Vue partielle du bain de fusion en 3D, de sa géométrie et des vitesses d'écoulement à $t = 2.938\text{s}$ [43]	44
1.36	Evolutions des flux de chaleur en GTAW sur la face endroit pour différentes intensités, mesurés par [87] (a), et ceux mesurés par [88] (b)	46
1.37	Energies collectées (kW) en GTAW par une pièce en acier doux en fonction de la hauteur d'arc (mm) et du courant (A) [89] (figure de [32])	46
1.38	(a) Evolutions en GTAW de la puissance totale P_T (kW) et de la puissance reçue par l'anode P_A (kW) en fonction de la hauteur d'arc (mm), (b) évolutions du flux de chaleur (kW.cm^{-2}) en fonction du rayon de l'anode (cm) pour différentes hauteurs d'arc (mm) [87]	47
1.39	Distributions en GTAW du flux de chaleur (W.mm^{-2}) en fonction du rayon (mm) de l'anode en cuivre pour une intensité 100 A, un angle d'affûtage de l'électrode de 75° et pour différentes hauteurs d'arc (mm) [90]	48
1.40	(a) Maximum du flux de chaleur transmis à la pièce (W.mm^{-2}) en fonction de l'angle d'affûtage de l'électrode ($^\circ$) et de la hauteur d'arc (mm) pour un courant de 200 A [91], (b) évolutions du flux de chaleur transmis à la pièce (W.mm^{-2}) en fonction du rayon de la pièce (mm) pour un courant de 190 A et une hauteur d'arc de 5.5 mm [90]	48
1.41	Calorimètre à enveloppe Seebeck pour la mesure des rendements des procédés PAW et GTAW [93]	49
1.42	Rendement de l'arc (%) en fonction du courant (A) selon différents auteurs : (a) [94], (b) [95], (c) [96] et pour différents paramètres de soudage (figure de [32])	49
1.43	Rendement de l'arc (%) en fonction du courant (A) selon différents auteurs : (a) [31], (b) [33] et pour différents paramètres de soudage (figure de [32])	50
1.44	Evolution du rendement de l'arc (%) en fonction de la hauteur d'arc (mm) pour une anode en 304SS, sous argon, et une électrode affûtée à 30° [96] (figure de [32])	50
1.45	Rendements en fonction de l'angle d'affûtage de l'électrode pour (a) différents gaz de couverture, différentes vitesses de soudage, une pièce en acier HY-80, un courant de 175 A, et une hauteur d'arc de 2.54 mm [33], et (b) pour de l'argon, une électrode immobile, une pièce en acier 304SS, un courant de 100 A et une tension de 10 V [96] (Figure (b) de [32])	51
1.46	Influence (a) du diamètre de l'électrode (mm) et, (b) de la taille de la troncature (mm) de la pointe de l'électrode pour de l'argon, une électrode immobile, une pièce en acier 304, un courant de 100 A et une tension de 10 V [96] (Figure de [32])	51
1.47	Représentation schématique des différentes parties constituant un joint soudé [2]	52

1.48	Exemple d'un résultat numérique de contraintes résiduelles atteintes pour une soudure multipasses [100]	53
1.49	Schéma de synthèse des différents phénomènes physiques en soudage et de leurs interactions	54
2.1	Définition généralisée d'une chaîne de mesure	58
2.2	Description du dispositif expérimental	59
2.3	Exemple d'une structuration de centrale d'acquisition simplifiée	60
2.4	a) Bruit électrostatique; b) bruit électromagnétique [110]	61
2.5	Exemple choix de jauge et technique de câblage [110]	62
2.6	Schéma d'un capteur d'effort et de son environnement	63
2.7	Mesures d'efforts de deux expériences répétées [9]	64
2.8	Diagramme du spectre électromagnétique [116]	65
2.9	Schéma de principe d'une caméra thermique IR	69
2.10	a) Image brute en [NG]; b) Résultat obtenu avec les paramètres de Rotrou	70
2.11	a) Image brute en [NG]; b) Résultat obtenu avec les paramètres de Rotrou	71
2.12	Dispositif expérimental pour la détermination des paramètres du modèle radiométrique	71
2.13	Comparaison du modèle radiométrique en fonction des paramètres utilisés	72
2.14	a) Signaux thermocouples; b) Résultat avec les nouveaux paramètres	72
2.15	principe instrumentation optique	73
2.16	courbe de la réponse spectrale de la caméra PHANTOM [©] V5.0	74
2.17	utilisation de filtre interférentiel à bande étroite, "méthode FIBE"	76
2.18	image extraite d'une vidéo obtenue avec un FIBE (470 nm)	76
2.19	image extraite d'une vidéo obtenue avec un FIBE (650nm)	77
2.20	dispositif expérimental : réflexion spéculaire	77
2.21	images extraites d'une vidéo obtenue avec la diode laser continue	78
2.22	images extraites d'une vidéo obtenue avec la diode laser pulsé	79
2.23	dispositif expérimental : ombroscopie	80
2.24	images extraites d'une vidéo obtenue par ombroscopie	81
2.25	Synchronisation matériel multi-cartes NI [©]	83
2.26	Diagramme du programme de synchronisation matérielle sous Labview [©] 8.0	83
2.27	Utilisation du signal strokes pour la synchronisation de la caméra	84
2.28	Diagramme résumant le fonctionnement de la plateforme expérimentale	85
2.29	Capture d'écran d'un cluster d'information du logiciel d'acquisition	86
2.30	Capture d'écran d'un champ de configuration de voie du logiciel d'acquisition	86
2.31	Photo de la plateforme expérimentale	87
3.1	Voies d'optimisation possibles pour diverses problématiques	91
3.2	Schéma une approche pour l'optimisation	93
3.3	Structuration des données	95
3.4	Modules et structure de la BAME	96
3.5	Différents signaux interfacés avec la classe bameTest	97
3.6	Relations bases de données de simulation et expérimentales. Chps : champs, Vol Volumique, Surf : Surface, Ctr : contour, Loc local (ponctuel), PostM : Post Mortem	98
3.7	Fast Fourier Transform des signaux intensité et acoustique	101
3.8	Images et le signal intensité synchronisés pour l'analyse du transfert de la gouttelette vers le bain de fusion	101
3.9	Mesures thermocouples pour deux énergies	103
3.10	Schéma de la structure interne d' erCv	104
3.11	Dispositif expérimental pour la détection de contour du bain de fusion en GTAW	105
3.12	Image de l'échiquier pour corriger les perspectives des images du bain de fusion	106
3.13	Détection de contour du bain de fusion en GTAW, certains reflets ont pu être supprimés	106

3.14	Evolution de l'aire du bain de fusion en cours de soudage TIG et la consigne courant	107
3.15	Dispositif expérimental pour l'étude du transfert pulsé en GMAW	107
3.16	Images du transfert d'une gouttelette avec détection de contour	108
3.17	Trajectoire de la gouttelette décomposée en x et y en fonction du temps	109
4.1	Dispositif expérimental et éprouvettes	113
4.2	Photo du dispositif expérimental	114
4.3	Modèle géométrique pour l'étude des conditions aux limites au cours du soudage	115
4.4	Evolution des efforts dans le plan au cours du temps (temps de soudage environ 50 s)	117
4.5	Evolution de la déformation de flexion au cours du temps (temps de soudage environ 50 s)	118
4.6	Distorsions hors plan (toutes les dimensions sont en mm)	119
4.7	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour un thermocouple à 10 mm et à 40 mm pour un acier inoxydable soudé en courant lisse et 70 A . .	119
4.8	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques du bain de fusion pour un soudage en courant lisse et 70 A	120
4.9	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour l'effort en X mesuré avec le capteur pour un acier inoxydable soudé en courant lisse et 70 A	121
4.10	Corrélation sur le temps d'acquisition entre les signaux d'effort en X et les thermocouples	122
4.11	Dispositif expérimental pour la mesure acoustique en cours de soudage	124
4.12	Images et signaux synchronisés pour l'analyse du transfert de la gouttelette vers le bain de fusion	124
4.13	bameGetFFT des signaux acoustiques pour trois conditions de soudage	125
4.14	Un défaut apparaît en cours de soudage : signal acoustique et la soudure résultante	125
4.15	Comparaison signal de puissance avec sa transformée de Fourier pour un bon transfert	126
4.16	Détection d'un mauvais transfert	126
5.1	Définition du système étudié	130
5.2	Localisation des phénomènes possibles.	131
5.3	Détermination du R_{cible} de la cible	132
5.4	Principe des essais, acquisition d'images en vidéo rapide par ombroscopie	134
5.5	Description d'une image de la macro-goutte en cours de soudage	134
5.6	Diagrammes présentant en (a) l'ensemble des images disponibles (ronds) sur le signal intensité; et en (b) les images pré-sélectionnées (carrés) sur le même signal pour le post-traitement via erCv de la macro-goutte	135
5.7	Images extraites d'une séquence vidéo du système macro-goutte en cours de soudage avec les surfaces libres détectées par erMacroDropAnalysis	136
5.8	Comparatif des relevés manuels et automatiques du rayon R_m (a) et des angles de mouillage θ_{ag} , θ_{ad} (b) de la macro-goutte (correspondance numéro images figure 5.7)	136
5.9	Diagrammes présentant en (a) l'ensemble des images disponibles (ronds) sur le signal intensité; et en (b) les images pré-sélectionnées (carrés) sur le même signal pour le post-traitement via erCv de la gouttelette en vol libre	137
5.10	Signal intensité associé aux images traitées	137
5.11	Vue générale des éprouvettes après essais et détails de la macro-goutte (macrographie et vue de dessus)	138
5.12	Mesures expérimentales : (a) tension et intensité en cours de soudage, (b) mesures de température pendant le soudage (durée 4s) et au cours du refroidissement . .	139

5.13	Images extraites de la séquence vidéo illustrant les étapes clés de la formation de la macro-goutte	139
5.14	Evolution du rayon de base de la macro-goutte au cours du soudage (essai type R)	140
5.15	Evolution des angles apparents de mouillage θ_{ag} , θ_{ad} au cours du soudage (essai type R)	141
5.16	Evolution des volumes de métal déposé et de la macro-goutte au cours du soudage (essai type R)	141
5.17	Trajectoires de plusieurs gouttelettes transférées entre l'électrode et la macro-goutte	142
5.18	Trajectoire décomposée sur les axes x et y pour une gouttelette transférée	143
5.19	Images extraites de la séquence vidéo illustrant la phase de solidification	144
5.20	Courbes décrivant l'évolution du front de solidification (essai R).	145
5.21	(a) macro-goutte liquide, puis solidifiée (b) de l'essai de référence. (c) macro-goutte après refusion en GTAW puis (d) re-solidifiée	146
5.22	Evolution du rayon de la macro-goutte en cours de soudage (essai type S)	147
5.23	Essais de type V : (a) évolution de la hauteur de la macro-goutte en fonction de la base, (b) évolution du volume de la macro-goutte en fonction du volume de métal d'apport dévidé	148
5.24	Essais de type V : (a) évolution de rayon de la macro-goutte en fonction du volume de métal d'apport, (b) évolution du volume de métal d'apport en fonction de l'énergie délivrée par la source	148
5.25	Essais de type V : évolution de U_m en fonction du paramètre procédé V_{fil}	149
5.26	Courbes décrivant l'évolution du front de solidification (essais de type V). . . .	149
5.27	Variation de la fréquence des gouttelettes : (a) évolution du rayon de base R_m et (b) de la hauteur h_m en fonction du temps de soudage (essais type F)	150
5.28	Évolution comparée de la hauteur de la macro-goutte et de la tension de soudage au cours de l'essai (essais type F)	150
5.29	Evolution des angles de mouillage apparents pour différentes températures initiales de la cible métallique : (a) en fonction du temps et (b) du volume normalisé (essais de type T)	151
5.30	Comparatif des signaux de température du thermocouple centré en face envers (T1 à la figure 5.11)	151
5.31	Images extraites à $t_{soudage} \approx 2.5s$ au cours d'un temps froid pour les essais de type G	152
5.32	Essais de type G : évolution du rayon de base (a) et de la hauteur (b) de la macro-goutte en fonction du temps pour plusieurs taux de CO_2	153
5.33	Evolution des angles de mouillage de la macro-goutte en fonction du temps pour plusieurs taux de CO_2	153
5.34	Evolution des angles de mouillage en fonction des volumes normalisés (type G) .	159
5.35	Angle de mouillage en fonction du paramètre d'étalement et paramètre d'étalement en fonction des volumes normalisés (type G)	160
5.36	Angles de mouillage moyens en fonction des nombres capillaires calculés (type G)	161
5.37	Evolution du paramètre étalement en fonction des volumes normalisés : (a) type V et (b) type F	161
5.38	Evolution du nombre de We en fonction du nombre de Z	162
5.39	Angle de mouillage à la fin de la phase établie en fonction nombre Ca	163
5.40	Angle de mouillage à la fin de la phase établie en fonction du nombre de Peclet .	163
6.1	Cartographie des instabilités du bain de fusion suivant la vitesse et l'énergie du procédé TIG [158]	167
6.2	Soudure constituée de "Hump" et de "Valley"	168
6.3	Modèle fluide de humping GMAW [26]	169

6.4	Comparaison de séquences d'images thermiques (températures en degrés K) vue de profil pour la simulation et l'expérimentation d'une soudure avec le phénomène de "humping" [103]	170
6.5	Corrélation entre deux groupes adimensionnels (π_1 , π_2) de Nguyen et al [26] pour la prédiction du humping suivant le mode opératoire en GMAW	170
6.6	Schéma régime humping en LBW [147; 162]	171
6.7	Position de la caméra vis-à-vis de la pièce soudée	172
6.8	Etapas et mécanismes du "humping"	173
6.9	Soudure constituée de "Hump" et de "Valley" (a), macrographies d'une valley (b) et d'un hump (c) [26]	174
6.10	Dispositif expérimental pour l'analyse dimensionnelle d'un hump	175
6.11	Images acquises pour l'évolution d'un hump avec les profils détectés	176
6.12	Profils détectés par erHumpAnalysis	176
6.13	Evolution de la position de la surface libre (en x et y) d'un hump en fonction du temps (en construction 2D)	177
6.14	Cas II illustrant l'apparition d'une "valley" suite à un manque de fusion localisé du substrat [163]	178
6.15	Evolution de la variation de la vitesse fluide suivant la hauteur de la veine liquide	179
6.16	Evolution du nombre de Froude (Fr) en fonction de la hauteur de la veine liquide	179
6.17	Illustration du ressaut hydraulique pour la phase 1 du phénomène de humping en régime établi	180
6.18	sections du bain de fusion pour $\theta < \pi/2$ (a) et $\theta > \pi/2$ (b)	180
6.19	Evolution de la pression interne du hump (a) pour $\theta < \pi/2$ et (b) $\theta > \pi/2$ en fonction de h	181
3	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques du bain de fusion pour un soudage en courant lisse et 70 A	183
4	Description image macro-goutte en cours de soudage	184
A.1	Représentation d'un capteur LEM ®	206
A.2	Principe de fonctionnement d'un débitmètre massique BRONKHORST ®	207
A.3	Photo du tachymètre HKS ® dans le dévidoir	208

Liste des tableaux

1.1	Rendement théoriques de procédé à l'arc [3]	47
2.1	Synthèse des choix technologiques mis en œuvre pour l'instrumentation du procédé	68
2.2	tableau de synthèse de longueurs d'ondes à émission électromagnétique réduite selon le procédé, le métal de base et l'énergie à la source	75
2.3	bilan des différentes méthodes optiques	80
3.1	partie commune du script à toutes les données acquises	100
3.2	Script pour le traitement du signal acoustique en cours de soudage	100
3.3	Script de comparaison des signaux thermocouples pour plusieurs essais	102
4.1	Géométries des éprouvettes pour la mesure des efforts	112
4.2	Paramètres physiques thermiques	116
4.3	Paramètres mécaniques du matériau	116
4.4	Rigidités du capteur d'efforts	117
5.1	Définition des paramètres expérimentaux utilisés au cours de la campagne d'essais.	133
5.2	Synthèse qualitative sur l'effet de l'augmentation des paramètres opératoires sur les quantités dimensionnelles du système étudié (relativement à l'essai de référence).	154
5.3	Valeurs numériques fournies par la littérature pour différentes grandeurs.	159
6.1	Paramètres de soudage utilisés pour l'expérience.	175
B.1	Matrice dimensionnelle des variables mis en jeu dans le système étudié et partition en sous matrices A et B	209
B.2	Matrice complète permettant la définition des paramètres de l'étude et des groupes adimensionnels de la première approche	210

Annexe A

Instrumentations en soudage

L'objet de cette annexe est de préciser les différents choix technologiques qui ont été retenus pour l'instrumentation des paramètres procédés. Il s'agit notamment de présenter les différentes caractéristiques des moyens de mesure et les dispositions particulières qui ont été mis en œuvre afin de répondre contraintes liées aux différents types de mesures tout en garantissant l'intégrité de ces dernières.

Le courant (I)

L'intensité de soudage est le courant passant entre les pôles du générateur, qui est l'image du courant entre l'électrode et la pièce à souder. Les sources de courant utilisées peuvent délivrer jusqu'à 500 A avec des régimes très dynamiques tel qu'un pulsé à 400 Hz .

Les capteurs utilisables pour la mesure du courant de soudage sont un **shunt** et un **LEM**[©]. Le premier n'est ni plus ni moins qu'une résistance branchée aux bornes du générateur. Le principal inconvénient d'un **shunt** est le contact direct avec la source alors que le **LEM**[©] est isolé électriquement du câble de puissance [165]. Au vu des considérations précédentes, le choix d'un **LEM**[©] est plus judicieux. Un **LEM**[©] est un capteur dans lequel passe le câble de puissance. Il mesure le flux d'électrons par effet Hall et traduit l'intensité par un courant en mA . La bande passante est de 150 kHz en courant continu (DC). Le **LEM**[©] nécessite une alimentation (capteur passif). La position du capteur (proche de la torche ou du générateur) n'a pas d'importance étant donné que l'intensité de soudage est une information globale sur l'état du procédé.

Une résistance est utilisée en série avec le **LEM**[©] afin de conditionner le signal en $\pm 10\text{ V}$ (valeur indiquée par la documentation constructeur). La mesure est réalisée aux bornes de cette dernière. Le conditionneur est protégé des effets électrostatiques par une cage de Faraday. Les liaisons entre les étages **LEM**[©], conditionneur et échantillonneur se font avec des câbles coaxiaux blindés. L'échantillonnage de cette voie analogique est faite par une carte National Instrument¹. Elle est configurée en **RSE** (*Referenced Single Ended*, où le potentiel de référence est branché à la terre) afin d'éviter les dérives du signal. Sa bande passante est de 250 kHz pour l'ensemble des voies analogiques. Par les propriétés de cette chaîne de mesure croisées à celles des sources de courant de soudage à l'arc, le besoin en terme de fréquence d'échantillonnage est satisfait avec une fréquence maximale de 150 kHz (en n'utilisant qu'une seule voie).

La tension (U)

En règle générale, une tension d'arc en **TIG** peut varier entre 6 et 20 V , alors qu'en **MIG**, on parle plutôt de 40 V dans le cas le plus énergétique. La dynamique de la tension est directement

1. NI[©] PCI - 6229, M SERIES DAQ (32 analog inputs, 48 Digital I/O, 4 analog outputs)

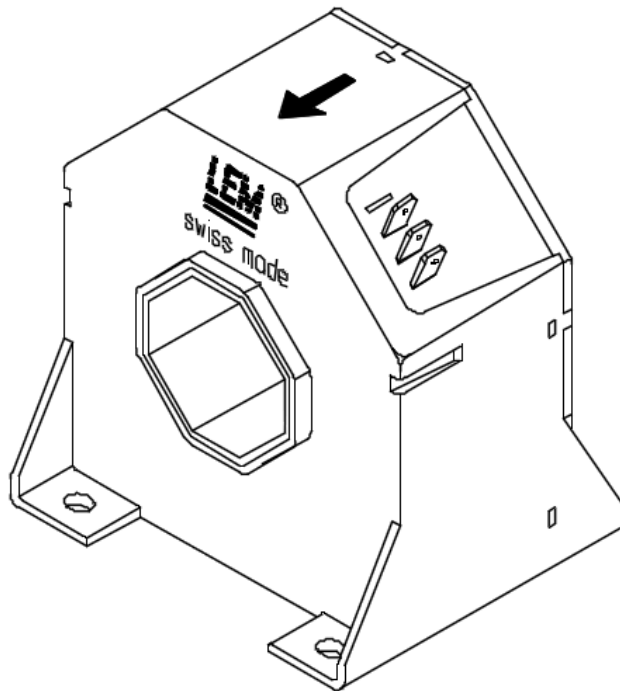


FIGURE A.1 – Représentation d'un capteur LEM[©]

liée à celle de l'intensité de soudage. Pour l'intensité de soudage, les fréquences peuvent atteindre 400 Hz pour un régime pulsé, soit une pulsation de la tension de 400 Hz . Pour l'assemblage de pièces en alliages d'aluminium, on peut être amené à utiliser des courants alternatifs. La tension à mesurer sera alors négative pendant la phase de décapage de l'alumine. Durant les phases d'amorçage de l'arc, la tension à vide est importante, de l'ordre de 80 V .

La tension d'arc est également un objet d'étude important dans la mesure où elle est l'image de la hauteur d'arc (distance électrode/surface bain de fusion). La mesure de la tension permet ainsi d'accéder à une information locale caractérisant l'état de l'opération d'assemblage, ce qui peut être très intéressant dans l'optique de contrôle du procédé.

La tension de soudage est mesurée par de différence de potentiels entre l'électrode et la pièce à souder (capteur actif). Ainsi, l'information est obtenue au plus proche de l'arc électrique, ce qui permet de s'affranchir de l'impédance des câbles de puissance qui est directement proportionnelle à leurs longueurs.

Le conditionneur est un pont diviseur dimensionné suivant une échelle de mesure comprise entre -10 et $+10\text{ V}$ pour des tensions d'arc de -100 à 100 V , permettant de couvrir la plage de tension d'arc. Ce conditionneur n'a pas de bande passante. Cependant les résistances du pont diviseur peuvent subir une dilatation thermique dans le cas d'utilisation longue, introduisant ainsi une source d'erreur. Afin d'isoler le conditionneur de l'échantillonneur (bande passante 250 kHz , câblé en RSE) des risques de retour d'arc, un optocouplage de la voie est mis en œuvre. Dans cette configuration, dans le cas d'une utilisation individuelle, la fréquence d'échantillonnage peut atteindre 250 kHz .

Le débit de gaz

Le flux gazeux est un élément procédé important assurant à la fois la création d'un plasma d'arc et la protection de la soudure, par le choix de la composition du gaz et du débit. La nature

du gaz (argon, CO₂, mélange...) varie selon les matériaux, la position des pièces à souder, et les densités et chaleurs spécifiques peuvent être très différentes, ce qui a une incidence sur le débit de gaz réel. En règle générale, on utilise un débit de l'ordre de 12 à 25 $l.min^{-1}$ selon l'application. Le gaz de protection est stocké dans des bouteilles de gaz à 200 bar (nommée B50). A la sortie de la bouteille, le gaz est détendu à 3 bar.

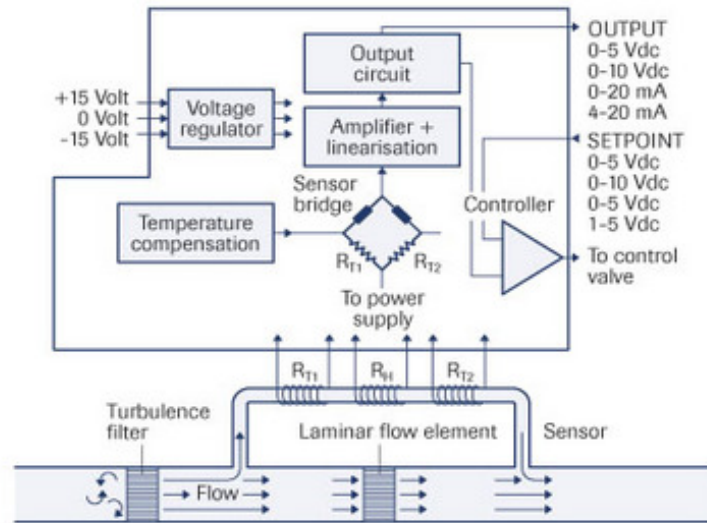


FIGURE A.2 – Principe de fonctionnement d'un débitmètre massique BRONKHORST[®]

Les capteurs pouvant satisfaire cette mesure sont des débitmètres à turbine et massique. Nous avons choisi un débitmètre massique BRONKHORST[®] pour sa précision et sa robustesse [166]. La position du capteur se situe sur le faisceau de la torche, afin d'être au plus proche de la source. Le débit de gaz sera contrôlé et régulé jusqu'à un débit maximum de 30 $L.min^{-1}$. Le capteur et le conditionneur sont intégrés dans le dispositif BRONKHORST[®] et doivent être alimentés (figure A.2). Sa bande passante est de 100 Hz . Le signal de sortie est en $\pm 10V$, donc directement câblé à la carte d'acquisition. La calibration du dispositif de mesure est garantie par le fournisseur pour de l'argon à une pression de 3 bar et un débit de 30 $L.min^{-1}$. Un abaque de conversion permet d'ajuster les paramètres de calibration suivant la nature du gaz de protection utilisé. L'équation A.1 donne la relation entre la pleine échelle du signal et le débit réel du gaz en fonction du gaz utilisé [166].

$$V_{signal} = KC_p \Phi_m = KC_p \rho \Phi_v \quad (A.1)$$

Où V_{signal} est le signal de sortie en $\pm 10V$, K une constante, C_p la chaleur spécifique, ρ la masse volumique du gaz, Φ_m le débit massique et Φ_v le débit volumique.

La vitesse fil (V_{fil})

En soudage MIG-MAG, le paramètre maître est la vitesse fil V_{fil} . Ce paramètre lie à la fois l'intensité de l'arc et le volume de métal d'apport dévidé (chapitre 1). En règle générale, la vitesse de dévidage du fil est constante et peut varier de 3 $m.min^{-1}$ à 30 $m.min^{-1}$. Il existe tout de même le procédé CMT de Fronius[®], qui a pour particularité d'avoir un dévidage oscillant pouvant atteindre des fréquences de l'ordre de 200 Hz (retrait du fil, cf. section 1.2.1.2). Pour assurer ce mode de fonctionnement, il est nécessaire de connaître en temps réel la position du fil au plus proche de l'arc ; pour y parvenir, Fronius[®] a dû développer une torche spécifique.

Le capteur qui se prête à l'acquisition de ce paramètre est un tachymètre. Notre choix est un matériel HKS[®] de référence DV25 M [39]. Il s'agit d'un tachymètre conçu pour être logé dans le dévidoir, à proximité des galets d'entraînement (figure A.3). Le capteur est alimenté. Sa bande passante est de 10 kHz . Cette instrumentation n'est pas adaptée pour la mesure de la vitesse fil à l'extrémité de la torche, ce qui aurait pu donner des informations sur la stabilité du transfert (rémanent, frottement, flambage du fil de diamètre de l'ordre du millimètre dans la gaine d'une longueur d'environ $1,5\text{ m}$). Ce dispositif donne cependant accès à une information globale et réelle (vis-à-vis de la consigne) sur le volume dévidé en cours de soudage. Le signal de sortie est une tension sous forme d'impulsions ($U_{\text{crête}} = 5\text{ V}$). Une impulsion correspond à un tour du tachymètre. Le fournisseur a calibré le matériel pour une gamme de vitesses fil comprises entre 5 et 25 m.min^{-1} et fournit la fonction de calibration.

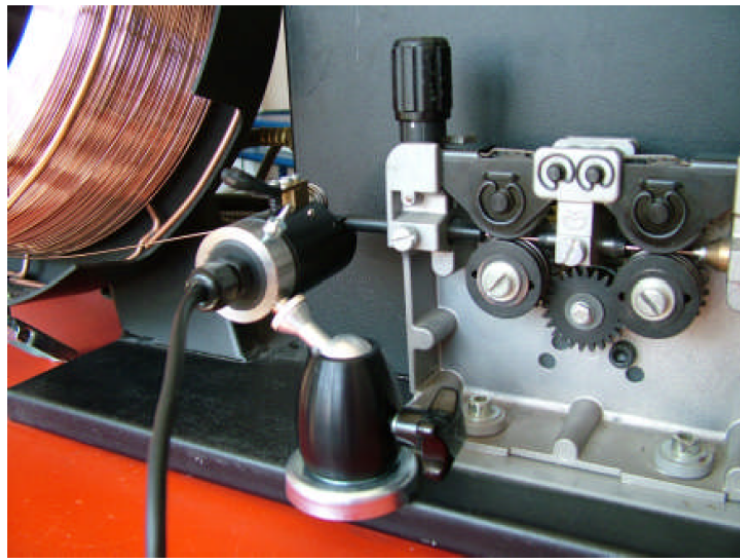


FIGURE A.3 – Photo du tachymètre HKS[®] dans le dévidoir

Ce signal est échantillonné avec un compteur de fréquence de la carte NI[®]. Les compteurs de ces cartes supportent des tensions crêtes de 5 V , ce qui a pour avantage de ne pas nécessiter de conditionnement supplémentaire. Ce type d'instrumentation demande par contre une attention particulière vis-à-vis de l'environnement de mesure. Pour que les compteurs puissent repérer les impulsions, le signal de sortie du tachymètre doit être absolument exempt de bruit.

Annexe B

Théorème de Buckingham-Pi : procédure d'assemblage

L'objet de cette annexe est de détailler la procédure d'assemblage du théorème de **Buckingham-Pi** pour déterminer les nombres adimensionnels pertinents pour l'étude du comportement dynamique du bain de fusion **P-GMAW** (cf. chapitre 5).

D'après le théorème de **Buckingham**, il faut donc prendre en compte $6 + 3 - 4 = 5$ groupes adimensionnels. Ces groupes adimensionnels sont construits ci-après.

Il s'agit d'abord de composer la matrice dimensionnelle comme présentée au tableau B.1.

TABLE B.1 – Matrice dimensionnelle des variables mis en jeu dans le système étudié et partition en sous matrices A et B

	sortie			entrée						
	R_m	h_m	u_m	P	γ	ΔT	c_p	λ	ρ	
longueur [L]	1	1	1	2	0	0	2	1	-3	
masse [M]	0	0	0	1	1	0	0	1	1	
temps [T]	0	0	-1	-3	-2	0	- 2	-3	0	
température [θ]	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	
	matrice B					matrice A				

Les détails du calcul sont donnés dans l'annexe de l'article [26]. La matrice complète, résultante du calcul matriciel, permet la définition des paramètres de l'étude et des groupes adimensionnels de la première approche. Elle est présentée au tableau B.2.

Les 5 groupes adimensionnels obtenus sont :

$$\pi_1 = \frac{R_m \rho c_p^{1.5} \sqrt{\Delta T}}{\lambda} \quad (\text{B.1})$$

$$\pi_2 = \frac{h_m \rho c_p^{1.5} \sqrt{\Delta T}}{\lambda} \quad (\text{B.2})$$

$$\pi_3 = \frac{u_m}{\sqrt{\Delta T} c_p} \quad (\text{B.3})$$

$$\pi_4 = \frac{P \rho c_p^{1.5}}{\lambda^2 \sqrt{\Delta T}} \quad (\text{B.4})$$

TABLE B.2 – Matrice complète permettant la définition des paramètres de l'étude et des groupes adimensionnels de la première approche

	sortie			entrée					
	R_m	h_m	u_m	P	γ	ΔT	c_p	λ	ρ
longueur [L]	1	1	1	2	0	0	2	1	-3
masse [M]	0	0	0	1	1	0	0	1	1
temps [T]	0	0	-1	-3	-2	0	-2	-3	0
température [θ]	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0
π_1	1	0	0	0	0	0.5	1.5	-1	1
π_2	0	1	0	0	0	0.5	1.5	-1	1
π_3	0	0	1	0	0	-0.5	-0.5	0	0
π_4	0	0	0	1	0	-0.5	1.5	-2	1
π_5	0	0	0	0	1	-0.5	0.5	-1	0

$$\pi_5 = \frac{\gamma \sqrt{c_p}}{\lambda \sqrt{\Delta T}} \quad (\text{B.5})$$

Les groupes adimensionnels π_1 à π_3 correspondent à des grandeurs de sortie (incluant des grandeurs d'entrée), tandis que les groupes adimensionnels π_4 et π_5 ne correspondent qu'à des grandeurs d'entrée.

RESUME

Les mécanismes dynamiques et de transport mis en jeu dans le plasma d'arc et le bain de fusion d'une opération de soudage à l'arc sont nombreux et fortement couplés. Ils produisent un milieu dont les grandeurs présentent des variations temporelles rapides et des gradients très marqués qui rendent toute analyse expérimentale complexe dans cet environnement fortement perturbé. Dans ce travail, on s'intéresse aux procédés TIG et MIG. Une plateforme expérimentale a été développée pour permettre la mesure synchronisée de différentes grandeurs physiques associées au soudage (paramètres procédé, températures, efforts de bridages, transferts métalliques, etc.). Des bibliothèques numériques dédiées aux études appliquées au soudage à l'arc sont également développées. Elles permettent le traitement de flux important de données (signaux, images) de manière systématique et globalisée. L'intérêt de cette approche pour l'enrichissement de la simulation numérique et le contrôle des procédés à l'arc est illustré dans différentes situations. Enfin, cette approche expérimentale est utilisée, dans le cadre de l'application choisie, pour obtenir des mesures suffisamment riches pour décrire le comportement dynamique du bain de fusion en P-GMAW. Une analyse dimensionnelle de ces mesures expérimentales permet d'identifier les mécanismes prépondérants qui interviennent et de déterminer expérimentalement les temps caractéristiques associés. Ce type d'approche permet notamment de mieux décrire le comportement d'une macro-goutte de métal fondu ou les phénomènes intervenant dans les problèmes de humping.

TITLE

An approach for optimizing arc welding applications

ABSTRACT

The dynamic and transport mechanisms involved in the arc plasma and the weld pool of arc welding operations are numerous and strongly coupled. They produce a medium the magnitudes of which exhibit rapid time variations and very marked gradients which make any experimental analysis complex in this disrupted environment. In this work, we study the TIG and MIG processes. An experimental platform was developed to allow synchronized measurement of various physical quantities associated with welding (process parameters, temperatures, clamping forces, metal transfer, etc.). Numerical libraries dedicated to applied studies in arc welding are developed. They enable the treatment of a large flow of data (signals, images) with a systematic and global method. The advantages of this approach for the enrichment of numerical simulation and arc process control are shown in different situations. Finally, this experimental approach is used in the context of the chosen application to obtain rich measurements to describe the dynamic behavior of the weld pool in P-GMAW. Dimensional analysis of these experimental measurements allows to identify the predominant mechanisms involved and to determine experimentally the characteristic times associated. This type of approach includes better description of the behavior of a macro-drop of molten metal or the phenomena occurring in the humping instabilities.

DISCIPLINE

Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil

MOTS-CLES

expérimentation, multiphysique, modélisation, mouillage, humping, contrôle, base de données, soudage GMAW-GTAW

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
UMR UM2-CNRS 5508
cc048 Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier Cedex 5