HAL open science

Interfaces, capillarité et mouillage dans les assemblages

Fabien Soulié

To cite this version:

Fabien Soulié. Interfaces, capillarité et mouillage dans les assemblages. Matériaux. Université de Montpellier, 2016. tel-01939658

HAL Id: tel-01939658

https://hal.science/tel-01939658v1

Submitted on 10 Dec 2018

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 de MONTPELLIER

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Date de soutenance : 15/06/2016

Interfaces, capillarité et mouillage dans les assemblages

Fabien Soulié

Jury :
- M. André Chrysochoos (PR, rapporteur)
- M. Frédéric Deschaux-Beaume (PR, examinateur)
- M. Pierre-Yves Hicher (PR, Président)
- M. Philippe Le Masson (PR, examinateur)
- M. Olivier Millet (PR, rapporteur)
- M. Patrice Peyre (DR, rapporteur)

Préambule

La présentation d'une HDR est un exercice individuel. Pourtant, la recherche me semble avant tout être une activité collective, et les travaux que je présente dans ce mémoire sont issus d'échanges et de collaborations aussi enrichissantes les unes que les autres. La construction d'un parcours et d'une démarche, concepts pour le moins personnels, n'est possible que grâce aux diverses rencontres et aux personnes qui nous accompagnent sur une partie plus ou moins longue du chemin. Aussi, je voudrais avant tout remercier les différentes personnes avec qui j'ai eu l'occasion de travailler dans le passé ou avec qui je travaille actuellement.

Parmi ces personnes, mes remerciements vont bien sûr en premier lieu à ceux qui m'ont accompagné lors du début de mes activités de recherche : mes encadrants de thèse et mes collègues doctorants. Je voudrais aussi remercier plus généralement ceux qui m'accompagnent depuis plusieurs années ; à savoir l'ensemble des collègues du laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), chercheurs, enseignants chercheurs et personnels administratifs et techniques, sans qui nos activités s'arrêteraient bien vite... Je tiens à remercier plus particulièrement les collègues de l'équipe "Assemblages Soudés" avec lesquelles je travaille depuis 2006 et qui m'ont permis de découvrir la richesse scientifique du monde du soudage. Les permanents de l'équipe : Cyril Bordreuil, avec qui je partage maintenant depuis plusieurs années un bureau commun et une salle de manips, Frédéric Deschaux-Beaume et Gilles Fras qui m'ont fait confiance et Sébastien Rouquette avec qui j'ai pu partager ma première expérience "internationale" d'encadrement. Et, bien entendu, les doctorants et post-doctorants avec qui j'ai pu travailler : Julien, Aurélie, Edward, Vincent, Sreedhar, Alexis et Romain. Parmi eux, j'adresse une mention plus particulière aux doctorants que j'ai accompagné durant leur thèse et à qui j'ai "emprunté" quelques résultats et figures présentés dans ce mémoire (je les remercie) : Julien (thèse co-encadrée avec Cyril et Gilles), Sreedhar (thèse co-encadrée avec Sébastien et Gilles), Alexis (thèse en cours, co-encadrée avec Cyril et Frédéric) et Romain (thèse en cours, co-encadrée avec Cyril).

Les activités professionnelles d'un enseignant-chercheur ne se limitent pas aux seules activités de recherche ; une part importante de notre temps est bien sûr consacrée aux activités d'enseignement, mais aussi d'administration. Ces différentes activités participent pleinement à la construction de notre parcours, au même titre que la recherche. Le poste que j'occupe actuellement m'offre une grande diversité d'interactions avec les différentes structures de l'université. J'interviens principalement dans une formation d'ingénieurs de Polytech Montpellier en spécialité mécanique orientée chaudronnerie/soudage. Cette formation, exclusivement par la voie de l'apprentissage et délocalisée au sein de l'IUT de Nîmes, constitue un département à part entière de Polytech (département MSI : Mécanique, Structures Industrielles). Seul enseignant-chercheur titulaire de ce département, j'en ai assuré la direction pendant six années (deux mandats consécutifs) et continue à participer activement à sa gestion. Cette organisation me permet de collaborer directement avec les collègues de Polytech bien entendu, mais aussi de l'IUT et du CFA. Je les remercie pour la richesse de nos échanges. Pour certains, ces échanges sont très fréquents, voire quotidiens comme avec Denis Cervellin, avec qui je travaille à l'animation de cette formation depuis plusieurs années, ou a minima hebdomadaires dans nos réunions de conseil de direction du jeudi après-midi... La richesse des interactions trouve bien sûr sa source première dans les

échanges que nous avons avec les étudiants et les apprentis qui sont au coeur de notre métier et dont les attentes et besoins me permettent de rester pragmatique et concret. L'apprentissage m'apporte de plus, en tant qu'enseignant et chercheur, une certaine proximité avec les problématiques du milieu industriel.

La diversité de ces interactions m'offre ainsi la chance de pouvoir mener des activités de recherche fondamentale mais qui restent proches de l'application et des préoccupations industrielles. Mon travail et ma démarche de recherche sont principalement basés sur un dialogue entre l'expérimentation et la modélisation, en s'appuyant sur des observations les plus riches possibles, avec quelques incursions (ponctuelles) dans le monde de la simulation numérique.

⋆⋆⋆

Le présent mémoire est organisé en deux parties, permettant d'accéder plus rapidement aux informations recherchées et d'en faciliter la lecture.

La première partie est dédiée à une présentation de mes activités de recherche. Il s'agit d'une présentation volontairement synthétique, sans que les concepts ou raisonnements soient détaillés. Une sélection d'articles est proposée en annexe, en fin de mémoire, permettant d'éclairer certains aspects. Il est bien entendu possible d'obtenir plus de détails en consultant les différents travaux associés à ces axes de recherche (thèses, articles, actes de congrès...).

La deuxième partie a un caractère plutôt administratif et correspond à une notice individuelle présentant de façon synthétique les différents volets de mes activités professionnelles.

Sommaire

I Interfaces, capillarité, mouillage dans les assemblages **7**

Quelques mots d'introduction **9**

1 Capillarité et assemblages **11**
1.1 Phénomènes de capillarité et de mouillage 11
1.2 Effets de capillarité dans les milieux granulaires 13
1.2.1 Cohésion par capillarité 13
1.2.2 Des ponts liquides aux ponts solides 15
1.3 Quelques effets de tension de surface/mouillage en soudage 17
1.3.1 Le soudage, une opération localisée avec des effets macroscopiques 17
1.3.2 Mouillage et qualité des cordons 18
1.4 Conclusion 20

2 Le soudage à l'arc, un problème complexe **23**
2.1 Problématique multiphysique 23
2.2 Une approche expérimentale, adaptée au soudage à l'arc 27
2.2.1 Positionnement 27
2.2.2 Méthodologie d'étude 28
2.2.3 Un milieu d'étude spécifique 29
2.2.4 L'exemple du bain de fusion en soudage TIG 30
2.3 Conclusion 32

3 Phénomènes d'interfaces en soudage à l'arc **35**
3.1 Thermocapillarité 35
3.2 Étalement et comportement au mouillage 37
3.3 Frontière liquide/solide 43
3.4 Conclusion 45

4 Poursuivre... **47**
4.1 Problématiques physiques 47
4.2 Outils et protocoles d'investigation 48
4.3 Fabrication additive par procédés arc 51
4.4 Conclusion 51

Conclusion **53**

Première partie

Interfaces, capillarité, mouillage dans les assemblages

Quelques mots d'introduction

Mes premiers travaux de recherche, au cours de ma thèse et en tant qu'ATER, ont concerné l'étude des milieux granulaires non saturés cohésifs. La diversité de comportements de ces milieux, et des phénomènes capillaires qui s'y rapportent, a contribué à renforcer ma curiosité et à développer mon intérêt pour la recherche. En 2006, j'ai été recruté sur un poste de maître de conférences à Polytech Montpellier et au LMGC, au sein de l'équipe "Assemblages Soudés". Ce changement de thématique m'a permis de découvrir la richesse technique et scientifique du soudage et les activités de recherche qui y sont associées. Depuis, je m'intéresse plus particulièrement à l'étude des zones liquides impliquées dans les opérations de soudage à l'arc, avec une approche principalement basée sur l'expérimentation.

Le présent mémoire dresse un panorama de mes différentes activités de recherche autour d'un fil conducteur. Ce panorama est volontairement synthétique et le détail des développements, analyses, discussions et résultats, est disponible dans les publications et mémoires de thèse qui se rapportent à ces travaux.

Ce document est organisé autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre permet de présenter le fil conducteur de mes activités : les problèmes d'interfaces, de mouillage et de capillarité dans les assemblages. Après un rapide rappel sur les notions de capillarité et de mouillage, sont présentées une synthèse de mes travaux sur les matériaux granulaires cohésifs et une première mise en situation des problématiques de mouillage en soudage.

Le second chapitre présente la diversité des phénomènes et des échelles mis en jeu au cours d'une opération de soudage à l'arc. Une approche expérimentale, construite en intégrant les spécificités de l'expérimentation dans ce contexte, est proposée. Cette approche accorde une place importante à l'observation et aux techniques d'imagerie rapide qui permettent d'appréhender le comportement dynamique des phases liquides qui sont au coeur du procédé de soudage.

Le troisième chapitre s'intéresse plus particulièrement au comportement des interfaces et des zones liquides en soudage à l'arc, avec un intérêt plus marqué pour les problématiques de thermocapillarité, de comportement au mouillage et d'évolution de la zone frontière solide/liquide en cours de solidification. Ces différentes études illustrent l'importance des couplages énergétiques et des effets d'échelles mis en oeuvre.

Le quatrième et dernier chapitre propose des pistes d'études futures ainsi que des travaux de recherche qui viennent juste de débuter et qui visent à enrichir nos connaissances de ces comportements complexes.

Chapitre 1

Capillarité et assemblages

Ce premier chapitre présente des thématiques communes, bien qu'abordées dans des contextes différents, à mes différents travaux de recherche : les phénomènes de capillarité, et donc de surfaces fluides (liquide-gaz), et les problématiques d'assemblages. Ces derniers peuvent être considérés comme complexes. C'est le cas par exemple des matériaux granulaires cohésifs pour lesquels la complexité provient de la multitude de grains mobilisés, de leur diversité, en particulier de tailles, et du grand nombre de contacts et d'interactions mis en oeuvre. Pour les assemblages granulaires humides, les ménisques liquides qui peuvent se développer entre deux grains en contact participent pleinement au comportement mécanique de l'assemblage. La cohésion macroscopique trouve ainsi son origine dans une interaction locale, à l'échelle des grains.

L'influence, sur le comportement macroscopique, d'un phénomène localisé au niveau des interfaces de relativement faibles dimensions se retrouve aussi au niveau des assemblages soudés. En effet, dans ce cas, la tenue mécanique des assemblages et le comportement des structures, qui en découle, sont conditionnés par le comportement d'un bain de fusion d'échelle centimétrique. Le caractère complexe des assemblages soudés est lié à la diversité des mécanismes mis en jeu ainsi qu'à la présence de nombreuses interfaces et de forts gradients thermiques dus à la co-existence de métal solide et de zones liquides à hautes températures.

1.1 Phénomènes de capillarité et de mouillage

Les phénomènes capillaires, et leurs diverses manifestations, constituent un sujet d'intérêt relativement ancien. Ainsi, dès le début du XVIIIème siècle, James Jurin a proposé une loi permettant de décrire le problème de l'ascension des liquides dans des tubes fins, ou "capillaires" (loi de Jurin, 1718). En 1805, les travaux de Laplace et Young permettent de caractériser le saut de pression qui accompagne la traversée d'une interface ; la différence de pression Δp de part et d'autre d'un ménisque est le produit de la tension de surface γ par sa courbure en ce point (définie par les rayons de courbure principaux R_1 et R_2) :

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{1.1}$$

Les phénomènes de tension superficielle se produisent à l'interface entre deux liquides non miscibles ou entre un liquide et un gaz, situation qui nous intéresse plus particulièrement. L'interface liquide-gaz se comporte comme une membrane tendue caractérisée par la tension de surface qui s'oppose à ses déformations. L'origine physique de la tension de surface est une différence dans le nombre et la nature des interactions attractives entre les molécules. A l'interface entre le liquide et le gaz, les molécules sont soumises à un ensemble de forces d'interactions non équilibrées, à la différences d'une molécule située au sein du liquide qui est soumise à des actions de même nature. Les molécules de liquide situées à l'interface sont donc attirées vers la masse de liquide et la surface du liquide est soumise à une force perpendiculaire à cette surface. C'est

cette attraction qui engendre la tension superficielle γ à l'interface.

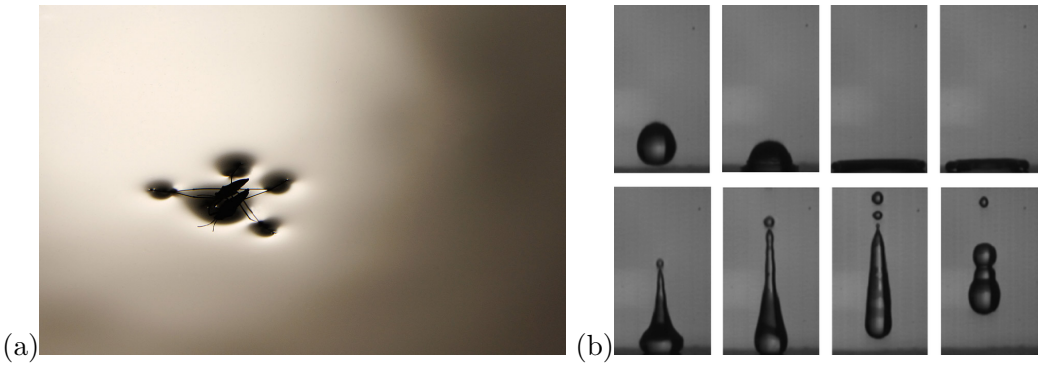


FIGURE 1.1 – Deux exemples des nombreux effets, parfois surprenants, liés à la tension de surface : (a) un gerris à la surface d'un plan d'eau ©Vincent Munier, (b) rebond d'une goutte sur une surface superhydrophobe [**?**].

Bien que son origine s'explique au niveau moléculaire, la tension de surface est une grandeur macroscopique qui est considérée comme une force par unité de longueur. Les effets de la tension superficielle sont clairement perceptibles à l'échelle macroscopique et peuvent parfois conduire à des phénomènes qui peuvent sembler contre-intuitifs. Dans le cas de l'eau par exemple, la tension de surface permet aux insectes de compenser leur poids propre et de se déplacer sur l'eau, à la surface d'une mare, ou à une goutte de rebondir sur une surface hydrophobe, tout en conservant sa cohérence à l'image d'un objet grandement déformable (figure 1.1). La tension superficielle varie considérablement d'un liquide à l'autre. Pour un même liquide, la tension de surface est très sensible aux conditions environnantes ou de mise en oeuvre dans le cas de procédés industriels. Les variations de tension de surface en fonction de la température et/ou de la composition du liquide peuvent entraîner des mouvements convectifs au sein du liquide. Les manifestations de cette convection de type Marangoni sont particulièrement perceptibles dans le cas des métaux liquides comme en soudage [**?**] ou dans les procédés à hautes températures dans lesquels les phénomènes d'interfaces jouent un rôle important [**?**].

Aux phénomènes de capillarité sont intimement liés les problèmes de mouillage. Le mouillage, qui décrit le comportement des liquides sur les solides, est caractérisé par l'angle de contact θ, aussi appelé angle de mouillage. L'angle de contact est défini au niveau de la ligne de contact, ou ligne triple, où se rencontrent les trois phases solide, liquide et gaz. La ligne triple est le lieu de terminaison des trois interfaces. A l'équilibre, chaque tension interfaciale agit de manière à réduire l'interface correspondante. L'angle de contact correspond à l'angle d'équilibre qui permet d'annuler la projection sur le solide de ces tensions interfaciales (figure 1.2). Le mouillage est une problématique complexe [**?**, **?**]. L'angle de mouillage peut en effet varier considérablement selon la composition chimique du substrat solide, du liquide, ou leurs défauts de composition chimique, selon la température ou selon la qualité de la surface solide, notamment en terme de rugosité [**?**]. Il existe de plus une hystérésis de l'angle de mouillage qui correspond à la différence entre l'angle d'avancée (valeur seuil de l'angle pour laquelle la ligne triple cède lorsqu'un surplus de liquide est injecté dans une goutte) et l'angle de reculée (valeur seuil de décrochage de l'angle lorsque du liquide est retiré de la goutte par pompage). Dans une même configuration, il est ainsi banal d'observer des variations de la valeur de l'angle de contact de plusieurs degrés, voire supérieures à la dizaine de degrés.

A ce jour encore, les phénomènes capillaires et les problématiques de mouillage constituent un thème de recherche important car de nombreux problèmes sont encore peu ou mal expliqués,

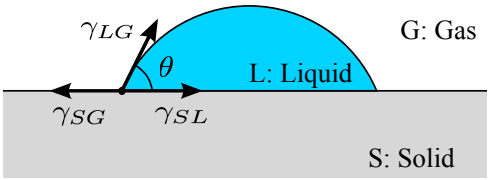


FIGURE 1.2 – La ligne triple (ligne de contact) est le lieu de terminaison de trois interfaces. A cet endroit, chaque tension interfaciale (γ_{SG}, γ_{SL} et γ_{LG}) agit de manière à réduire la surface de l'interface associée. La relation de Young (1805) traduit l'équilibre de ces tensions en projection sur le solide et permet de définir l'angle de mouillage (angle de contact) θ à travers l'équation suivante : $\cos\theta = \frac{\gamma SG - \gamma SL}{\gamma LG}$.

même dans le cas de l'eau et la compréhension de ces phénomènes s'enrichit continuellement.

1.2 Effets de capillarité dans les milieux granulaires

PRINCIPALES COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS : [**?**, **?**, **?**, **?**, **?**, **?**]

Les milieux ganulaires se caractérisent par la présence d'un squelette solide, constitué de grains en contact, et d'un espace poral qui autorise la présence de fluides au sein du milieu. Dans le cas des milieux granulaires non saturés, la co-existence des trois phases solide-liquide-gaz est à l'origine d'un très grand nombre d'interfaces et donc de phénomènes interfaciaux.

1.2.1 Cohésion par capillarité

Mes travaux de thèse m'ont permis d'aborder la problématique des phénomènes de capillarité dans le cas des milieux granulaires polydisperses non saturés. Ces phénomènes localisés au niveau des interfaces se révèlent à plus grande échelle par des manifestations bien visibles telles que la possibilité de construire des châteaux de sable ou de permettre la fabrication de comprimés pharmaceutiques [**?**, **?**].

FIGURE 1.3 – Pont liquide entre deux billes d'acier inoxydable [**?**].

L'origine de ces assemblages macroscopiques se trouve à l'échelle locale du doublet de grains, c'est-à-dire à l'échelle du pont liquide qui relie deux grains solides qui peuvent être de tailles différentes. Le pont liquide qui lie les grains solides est une très bonne illustration des couplages

forme-force qui peuvent se développer naturellement. A l'équilibre, les différentes interfaces qui définissent la forme géométrique du pont liquide (figure 1.3) définissent également la force de cohésion capillaire entre les deux grains. Cette force de cohésion capillaire peut être définie au niveau de la gorge du pont liquide (figure 1.4) par l'expression suivante :

$$F = 2\,\pi\,y_0\,\gamma + \pi\,y_0^2\,\Delta p \tag{1.2}$$

La force capillaire résulte de la contribution de la tension superficielle γ et du saut de pression Δp entre le liquide et l'air lié à la courbure de l'interface liquide-gaz. L'étude théorique à l'échelle locale du pont liquide (figure 1.4), basée sur la résolution l'équation de Laplace (eq. 1.1), couplée à une étude expérimentale développée spécifiquement à cette échelle, m'a permis de proposer un modèle local explicite de cohésion capillaire [**?**]. Ce modèle explicite, valable en configuration monodisperse ou polydisperse, est constitué :

— d'une part, d'une relation explicite donnant l'intensité de la force capillaire en fonction de la taille des grains, de la distance intergranulaire, du volume du pont liquide et de l'angle de contact,

— d'autre part, d'un critère de rupture en distance basé sur le volume du pont liquide et l'angle de contact.

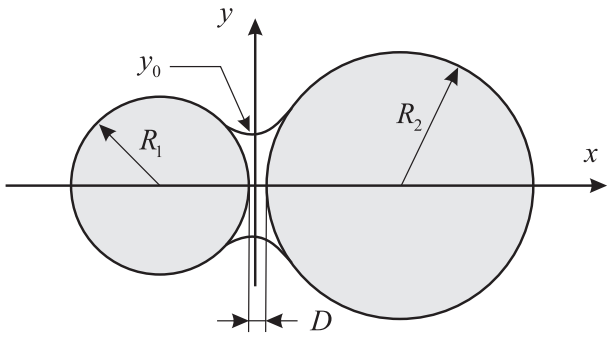


FIGURE 1.4 – Modèle géométrique d'un pont liquide entre deux grains, supposés sphériques, de rayons respectifs R_1 et R_2. Les grains sont éloignés d'une distance intergranulaire notée D. Le pont liquide recouvre les grains sur des portions solides de type calottes sphériques, l'angle de mouillage θ étant défini au niveau de la ligne triple. Le rayon de gorge y_0 correspond à la plus petite section du pont liquide.

L'approche couplée théorie/expérimentation permet à la fois de mieux appréhender le comportement du pont liquide et la sensibilité aux différents paramètres mais également de valider par comparaison le modèle théorique. Malgré sa complexité relative, l'intérêt de ce modèle analytique explicite est double : outre la possibilité de relier le comportement local au comportement macroscopique grâce à des grandeurs transposables entre ces deux échelles, il est également possible d'intégrer des variations de mouillage et de tenir compte de l'évolution de l'angle de mouillage, voire de son hystérésis. La mesure, à l'aide de photographies, de l'angle de mouillage au cours d'un essai de traction sur un doublet capillaire permet de proposer une relation empirique qui traduit son évolution. La prise en compte de cette évolution de l'angle de mouillage dans le modèle de cohésion capillaire permet de retrouver analytiquement le comportement non monotone de la force capillaire observée expérimentalement au cours de l'essai de traction [**?**].

L'influence des forces capillaires locales sur le comportement macroscopique des assemblages granulaires est étudiée à la fois par des expérimentations et des simulations numériques à l'échelle d'un échantillon [**?**]. Des essais de compression simple sont réalisés sur des séries d'échantillons composés de billes de verre polydisperses, à granulométrie contrôlée, pour différentes teneurs en eau (figure 1.5(a)). Ces essais ont permis de montrer une augmentation de la résistance méca-

nique avec la teneur en eau, avec une augmentation rapide pour les faibles teneurs en eau. Cet accroissement de la résistance mécanique s'observe dans le domaine pendulaire, c'est-à-dire tant que la connectivité des ponts liquides reste limitée. Le changement d'échelle local-global a aussi été étudié grâce à des simulations numériques de type DEM (Discrete Element Method) qui permettent la prise en compte explicite de lois d'interactions locales entre les particules (contact, frottement, cohésion...). Des échantillons numériques de tailles identiques aux échantillons expérimentaux sont réalisés avec des granulométries similaires. Les interactions entre grains prennent en compte le contact, le frottement et les interactions capillaires à travers le modèle explicite local associé à une méthode de répartition de l'eau au sein de l'échantillon. Des essais de compression simple sont réalisés pour les mêmes plages de teneurs en eau (figure 1.5(b)), permettant d'observer des comportements comparables expérimentalement et numériquement. Ces études à l'échelle de l'assemblage ont aussi permis de mettre en évidence l'importance de la densité des ponts liquides par unité de volume dans le comportement global des assemblages granulaires humides.

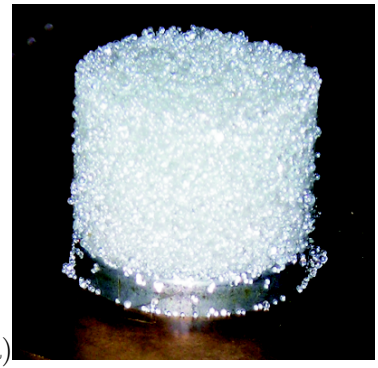
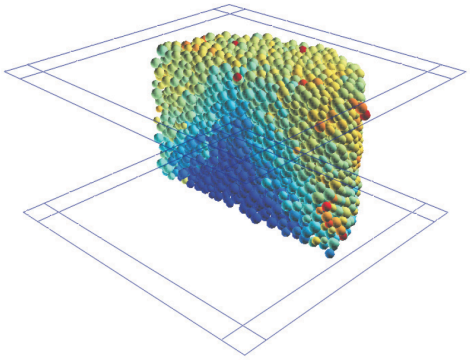
(a)  (b) 

FIGURE 1.5 – (a) Échantillon de billes de verre pour essai de compression axiale, (b) Champ de déplacement des particules dans une couche verticale d'échantillon au cours de la simulation d'un essai de compression axiale [**?**]. Une des grandes forces de la simulation numérique réside dans la possibilité d'accéder à des informations à l'échelle du grain. Par exemple, dans cette coupe d'échantillon granulaire, la couleur des particules (ou le niveau de gris pour les impressions N&B) correspond à la norme du déplacement. On peut ainsi observer l'existence d'une zone quasi-immobile au cours de l'essai ; cette zone centrale conique définit les plans de rupture de l'échantillon.

Ces travaux ouvrent des perspectives assez variées et ont permis d'initier, dans la continuité, des développements dans un certain nombre d'axes de recherche, comme par exemple : la simplification de la loi de cohésion capillaire pour faciliter son utilisation dans des simulations à grands nombres de grains [**?**], l'étude de la succion capillaire à l'échelle locale [**?**, **?**], la prise en compte d'un tenseur capillaire dans les matériaux granulaires humides [**?**] ou encore l'étude de l'évolution d'un pont liquide statique soumis à évaporation [**?**, **?**]. L'étude des ponts liquides constitue toujours un thème de recherche d'actualité, y compris sur le plan analytique [**?**].

1.2.2 Des ponts liquides aux ponts solides

Que ce soit dans le cas des procédés et des matériaux mis en oeuvre industriellement, ou dans le cas des milieux naturels tels que les sols, il est très rare que les ponts liquides soient constitués exclusivement d'eau pure. Un des premiers effets perceptibles est la modification de l'intensité de la force capillaire due à la modification des propriétés d'interfaces. A titre d'exemple, l'eau pure possède une tension de surface de 0,073 $N.m^{-1}$ alors que la tension de surface d'une saumure saturée en chlorure de sodium atteint 0,0828 $N.m^{-1}$. Une question qui se pose alors est de savoir

comment ces ponts liquides peuvent évoluer sous l'action des conditions environnantes ? Cette interrogation m'a conduit, en fin de thèse, à initier des travaux de recherche sur ce sujet. Une première série d'expériences prospectives a été réalisée dans le cadre du stage de DEA de Charles Voivret. Ces travaux ont par la suite été poursuivis en collaboration avec des collègues de différentes équipes du LMGC (Jean-Yves Delenne, Farhang Radjaï et Saïd El Youssoufi) [**?**, **?**, **?**].

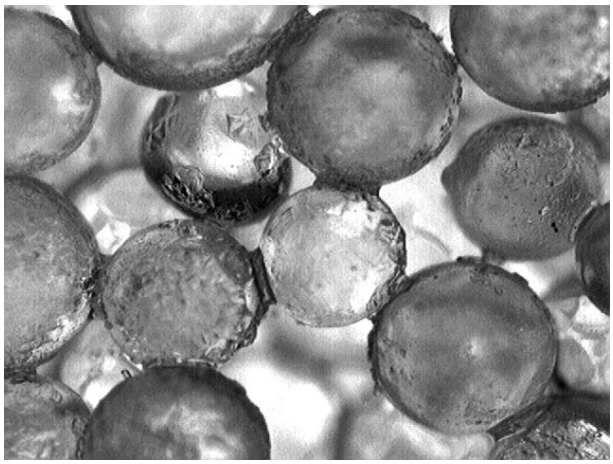


FIGURE 1.6 – Ponts liquides de saumure saturée et dépôts de chlorure de sodium cristallisé dans un assemblage polydisperse de billes de verre [**?**]. La formation des dépôts de chlorure de sodium provient de l'évaporation de l'eau contenue dans la saumure.

Afin d'appréhender l'évolution de la cohésion d'origine capillaire, des expériences ont été réalisées sur des séries d'échantillons granulaires polydisperses non saturés placés dans une atmosphère contrôlée en humidité et température. Les assemblages sont constitués d'un squelette solide composé de billes de verre ou de sable et de saumure saturée (figure 1.6), à différentes teneurs initiales en saumure (mélange d'eau et de chlorure de sodium). Sous l'action des conditions environnantes, les assemblages granulaires sont soumis à des changements de phase localisés aux interfaces : transferts d'eau à travers l'échantillon suite à l'évaporation de l'eau au niveau des interfaces liquide-gaz, entraînant une cimentation progressive des échantillons de la surface vers le coeur. La résistance mécanique des assemblages est déterminée grâce à des essais de compression simple, pour différentes durées de "séchage" sous atmosphère contrôlée. Ces essais ont montré l'existence d'un comportement analogue quelle que soit la teneur initiale en saumure saturée, le comportement macroscopique étant lié à un indice global de cristallisation (égal au ratio de la masse de NaCl cristallisé sur la masse totale de NaCl présente dans l'échantillon). L'ensemble des résultats peut d'ailleurs être ramené sur une seule et même courbe en utilisant des variables de description adéquates (figure 1.7). Trois régimes peuvent être mis en évidence : (1) un régime de type capillaire pour lequel la résistance mécanique est due aux seules forces capillaires, pour un indice de cristallisation inférieur à un seuil critique, (2) un régime transitoire qui correspond à la propagation de la cristallisation de la surface vers le coeur de l'échantillon et (3) un régime cimenté qui correspond à une résistance mécanique élevée dans lequel les ponts partiellement cimentés se renforcent.

Un modèle théorique a été proposé en prenant en compte les variables pertinentes à l'échelle locale du lien entre deux grains et à l'échelle macroscopique. Ce modèle est construit sur la base d'une loi locale de cohésion évolutive, d'un passage micro-macro intégrant la texture granulaire et d'une cinétique de cristallisation à l'échelle de l'échantillon. Le comportement macroscopique prédit par ce modèle théorique permet de retrouver les niveaux de résistance mécanique obtenus dans les régimes capillaires et cimentés, ainsi que la transition entre ces deux régimes, en bonne

adéquation avec les résultats expérimentaux (figure 1.7) [**?**].

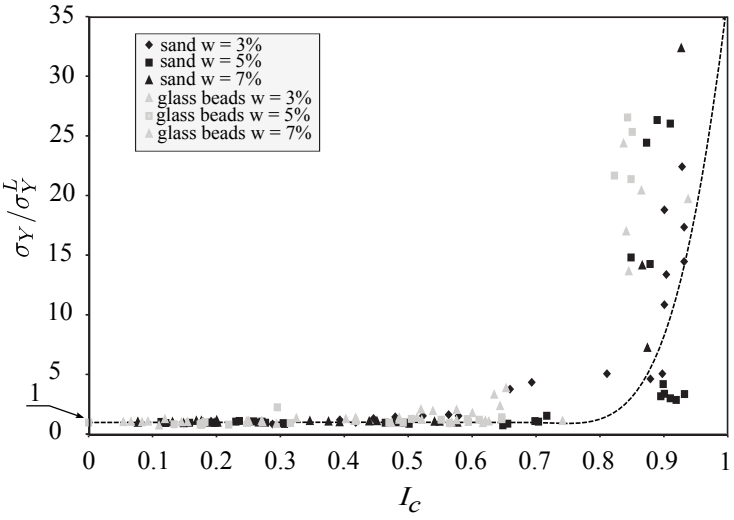


FIGURE 1.7 – Évolution de la résistance mécanique de matériaux granulaires en cours de cimentation, comparaison des données expérimentales et du modèle théorique. La contrainte à la rupture σ_Y des échantillons en cours de cimentation est normalisée par la contrainte à la rupture σ_Y^L due aux seules forces de cohésion par capillarité. Le taux de cimentation du milieu est donné par l'indice global de cristallisation I_c qui traduit le ratio de soluté cristallisé (NaCl) par rapport à l'ensemble de soluté initialement présent dans le milieu. Les données expérimentales correspondent aux différentes séries d'expériences : matériaux granulaires de type billes de verre ou sable et différentes teneurs initiales en saumure saturée w. La ligne en traits pointillés correspond au modèle théorique.

Le cadre proposé par ce modèle est assez général et peut être utilisé pour l'étude des matériaux granulaires soumis à des forces locales d'interaction évolutives ou à des changements de composition ou de phase. Cette approche peut par exemple concerner des applications diverses de types agglomérations de poudres (comme dans le cas du frittage), phénomène de cimentation/cristallisation ou, au contraire, dégradation de géomatériaux suite à la dégradation progressive des liens cimentés sous l'action des conditions environnementales.

1.3 Quelques effets de tension de surface/mouillage en soudage

Historiquement, le verbe *souder* remonterait à la fin du XIème siècle avec le mot *solder* qui signifie *"joindre deux pièces"*[1]. Le soudage est en effet une *"opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base"*[2]. Les procédés de soudage peuvent être d'origines assez variées et le cadre de ce mémoire sera limité au cas du soudage à l'arc.

1.3.1 Le soudage, une opération localisée avec des effets macroscopiques

Le soudage à l'arc se caractérise par un apport de chaleur localisé, transmis à la pièce grâce à la création d'un plasma d'arc entre deux électrodes : une liée au procédé et l'autre constituée par les pièces à assembler. La chaleur amenée par ce plasma permet de créer un bain liquide

1. d'après le Centre National des Ressources Textuelles et Lexicales
2. Dictionnaire Larousse

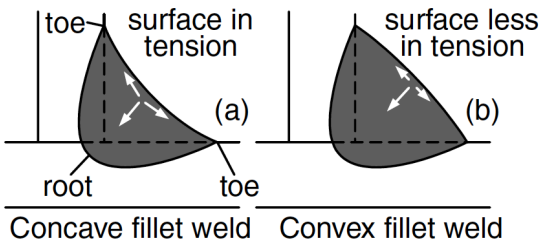


FIGURE 1.8 – Effet schématique de la géométrie d'un cordon de soudure sur l'état de contrainte au centre de la surface extérieure du cordon : (a) cordon d'angle concave, (b) cordon d'angle convexe [**?**].

de métal en fusion. Cet apport de chaleur peut s'accompagner ou non d'un apport de matière grâce à l'utilisation d'une électrode fusible (soudage MIG-MAG) ou de métal d'apport dans le cas de l'utilisation d'une l'électrode non fusible (soudage TIG). L'opération de soudage à l'arc mobilise ainsi dans un volume relativement réduit, de l'ordre de quelques centimètres cubes, de nombreuses interfaces : solide-liquide-gaz à l'extrémité du fil fondu, liquide-gaz pour les gouttelettes de métal liquide en transfert dans le plasma, liquide-gaz au niveau de la surface du bain de fusion et solide-liquide entre le bain de fusion et le métal de base non fondu mais affecté thermiquement. L'apport de chaleur, majoritairement fourni par le bain de fusion au niveau du métal de base et l'éclairage direct de l'arc, génère des gradients thermiques importants dans le solide.

Le déplacement du bain liquide, lié à la vitesse de soudage, s'accompagne d'une montée rapide en température et d'une dilatation thermique du métal de base. Il en résulte la mise en compression de la matière située en avant du bain liquide dans le sens de déplacement de l'interface solide-liquide. Lors du refroidissement, une contraction du métal apparaît, générant des contraintes résiduelles de traction dans le sens longitudinal. L'opération de soudage conduit ainsi à un état mécanique complexe et est source de déformations et de contraintes résiduelles parfois importantes. Peu ou mal maîtrisées, ces contraintes et déformations peuvent engendrer des amorces de fissures, des ruptures de pièces ou des défauts dimensionnels rendant les ensembles soudés inutilisables ou de durées de vie réduites.

Le soudage est une opération localisée, avec des effets à l'échelle de l'assemblage, voire de la structure. La compréhension des mécanismes de transferts (masse et chaleur) et du comportement du bain liquide et des différentes interfaces constitue donc un enjeu important pour la maîtrise de la qualité des assemblages soudés.

1.3.2 Mouillage et qualité des cordons

Le comportement au mouillage du métal liquide va contribuer à définir la forme finale du cordon de soudure dont la géométrie traduit des états de contraintes différents qui peuvent influencer la qualité de l'assemblage. Par exemple, dans le cas d'un cordon d'angle concave, au cours de la phase de refroidissement, lors du retrait, la face extérieure du cordon est sollicitée en traction (figure 1.8(a)). La face extérieure peut ainsi être considérée comme une surface tendue entre les zones extrêmes du cordon (racine et pieds de cordon), ce qui peut faciliter l'initiation de fissures au cours de la solidification. Dans le cas d'un cordon convexe, des contraintes de compression se développent, équilibrant ainsi partiellement les contraintes de traction (figure 1.8(b)). Au niveau de la surface extérieure, les contraintes de traction sont moindres, ce qui réduit les risques d'initiation de fissures. Cependant, une convexité excessive peut engendrer des concentrations de contraintes à l'origine d'une tenue en fatigue moindre. La géométrie du cordon

est donc importante et la prise en compte des caractéristiques de mouillage est un paramètre de contrôle de la qualité des cordons de soudure.

Des problèmes liés à la géométrie des cordons peuvent également apparaître lorsqu'on cherche à augmenter la productivité. En effet, l'augmentation de la productivité en soudage, qui se traduit par une augmentation de la vitesse de soudage et de l'énergie apportée, peut conduire à l'apparition de défauts critiques qui nuisent à la qualité des cordons de soudure. Parmi ces défauts, deux sont assez caractéristiques de par la forme des cordons obtenus : les défauts d'undercutting et de humping (figure 1.9). Le défaut généré par le phénomène d'undercutting est localisé en pied de cordon et se caractérise par la présence de sillons laissés vides par le métal fondu au cours de la solidification (figure 1.9(a)). Le phénomène de humping correspond à une ondulation périodique du cordon de soudure (figure 1.9(b)).

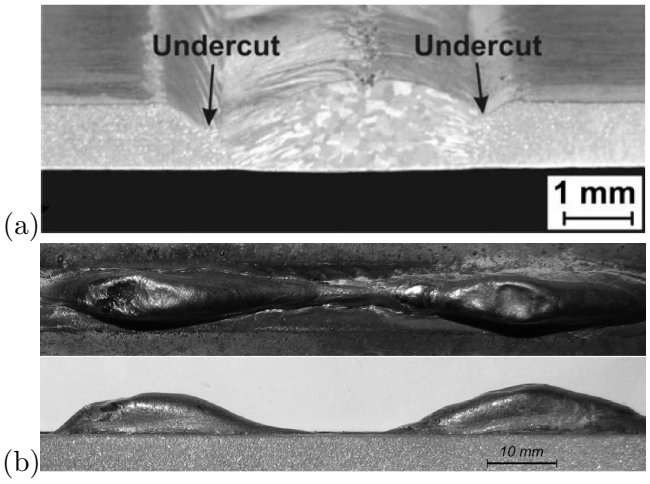


FIGURE 1.9 – (a) Défaut de type "undercutting" [**?**], (b) Défaut caractéristique du humping ; le cordon de soudure est constituée d'amas de matière, appelés "humps", régulièrement répartis et séparés par des zones plus pauvres en métal fondu, les "valleys" [**?**].

Ces formes très particulières de cordons sont dues aux instabilités qui se développent dans les zones liquides de métal fondu et peuvent apparaître pour les différents types de procédés de soudage par fusion (figure 1.10). Quelle que soit la façon dont l'énergie est amenée au système, une augmentation de la vitesse de soudage ou de l'énergie fournie peut conduire à l'apparition de ces défauts. La problématique du humping constitue un sujet de recherche important [**?**,**?**,**?**,**?**].

Au cours de ses travaux de thèse, Julien Chapuis a développé une démarche expérimentale permettant de mieux appréhender le phénomène de humping en soudage MAG (figure 1.9(b)). Des observations en vidéo rapide, au cours du soudage ont permis de mettre en évidence les différentes phases du phénomène (figure 1.11).

A grande vitesse de soudage, une première instabilité crée une réduction de la veine liquide de métal en fusion à l'arrière du bain de fusion. Sous l'effet conjugué du pompage thermique et de la réduction de la zone liquide, une solidification rapide apparaît, freinant l'écoulement du métal liquide et entraînant une zone d'accumulation (naissance du hump). Le long du cordon, la base du cordon est globalement constante en soudage MAG, mais le mouillage peut varier : l'angle de mouillage peut prendre des valeurs inférieures ou supérieure à $\frac{\pi}{2}$. La croissance du hump entraîne une augmentation localisée de la quantité de métal liquide, maintenu par les tensions de surface. La courbure de la zone liquide augmente au niveau du hump avec une diminution du mouillage, générant une dépression au sein de la veine liquide (eq. 1.1). Cette dépression accélère la circulation du métal liquide, générant alors la création d'une nouvelle constriction de la veine liquide qui va se solidifier rapidement. Ainsi, à conditions opératoires maintenues constantes, le

phénomène s'auto-entretient une fois qu'il est amorcé.
Le phénomène de humping s'apparente à une instabilité de type Plateau-Rayleigh. Il s'agit d'un phénomène complexe, couplant problèmes de mouillage, de dynamique des fluides, de thermique et de solidification. Dans ce type de problème, une approche expérimentale basée sur l'observation s'avère indispensable, en complément de toute approche théorique.

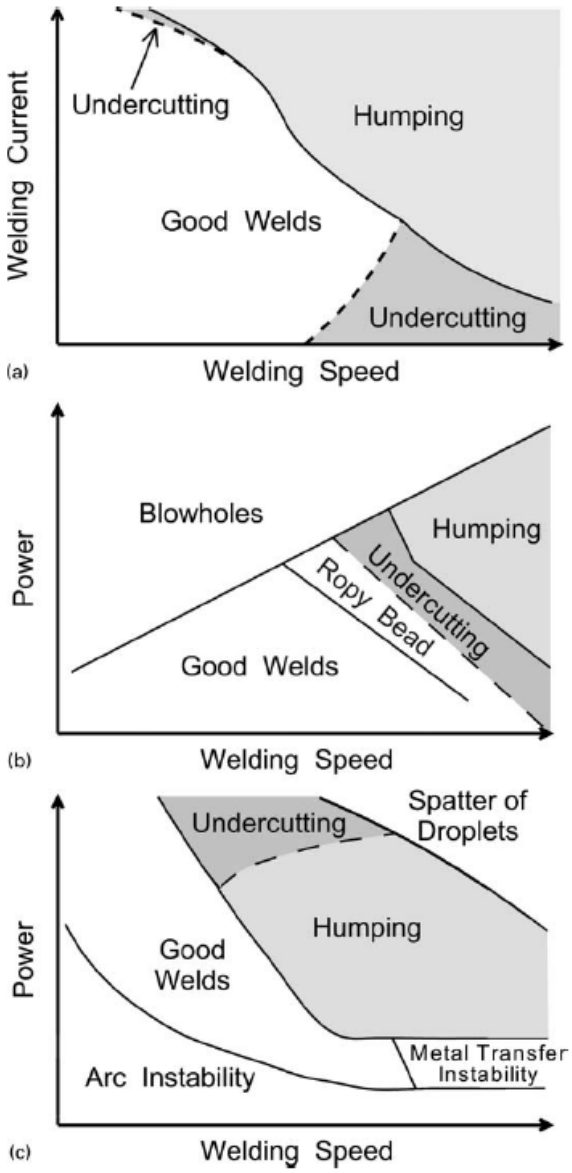


FIGURE 1.10 – Cartographie schématique des instabilités et des défauts de cordons pouvant se développer en soudage établie par Nguyen et al. [**?**] d'après des données de la littérature. (a) soudage TIG sur acier ordinaire au carbone, (b) soudage laser CO_2 sur acier inoxydable nuance 304, (c) soudage MAG sur acier doux. Les défauts apparaissent lorsque l'apport d'énergie et la vitesse de soudage ne sont pas en bonne adéquation.

1.4 Conclusion

Les phénomènes capillaires présentent une diversité d'effets et occupent une place importante dans le comportement des assemblages, que ce soit au niveau des assemblages granulaires ou des assemblages soudés. Le comportement global, à l'échelle de l'assemblage, trouve son origine à

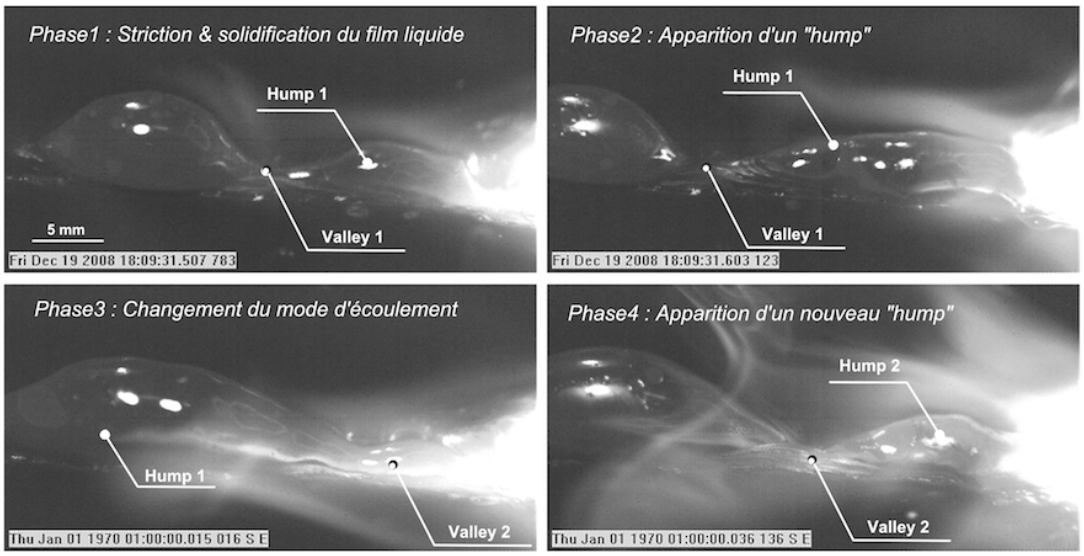


FIGURE 1.11 – Développement d'un défaut de humping en soudage MAG. Les différentes phases correspondent à la chronologie de développement d'un "hump" [**?**].

l'échelle locale, au niveau des interfaces qui sont le siège des différents mécanismes de transferts. La compréhension de comportement à l'échelle macroscopique nécessite la prise en compte de ces phénomènes et des grandeurs associées telles que tension de surface et angle de mouillage. Leur caractérisation expérimentale requiert le développement d'approches adaptées.

Dans la suite de ce mémoire, l'accent sera plus particulièrement mis sur l'étude du soudage à l'arc et du comportement des différentes interfaces avec les zones de métal liquide.

Chapitre 2

Le soudage à l'arc, un problème complexe

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux et les premières pièces fabriquées par soudage datent de l'âge du bronze. Depuis, le savoir-faire et les techniques se sont développés et perfectionnés, migrant progressivement d'une approche empirique à des fabrications basées sur des technologies de plus en plus complexes. Le développement rapide des procédés à la fin du XXème siècle s'est accompagné par des activités de recherche qui visent à mieux comprendre les principaux phénomènes physiques et les couplages mis en oeuvre dans les opérations de soudage [**?**]. La complexité de la recherche en soudage, mais aussi son intérêt premier, réside dans la richesse des phénomènes physiques mobilisés. L'étude du soudage permet d'aborder la plupart des grands domaines de la physique : physique de l'arc et du plasma, transferts de masse et de chaleur, mécanique des fluides, mécanique du solide, transferts thermiques, physique du matériau [**?**, **?**, **?**]...

L'objectif n'est pas ici de proposer une modélisation du soudage à l'arc mais de souligner la diversité des phénomènes, l'importance des interfaces, la variabilité des échelles spatiales et temporelles qui interviennent, et ainsi d'appréhender le rôle de l'expérimentation et de l'observation pour la compréhension qualitative et quantitative de cette problématique.

2.1 Problématique multiphysique

Au cours d'une opération de soudage à l'arc, les différents états de la matière coexistent dans un volume restreint de quelques centimètres cubes. La figure 2.1 permet d'illustrer les différentes zones d'intérêt et différents phénomènes physiques mis en oeuvre à travers l'exemple du soudage MIG/MAG.

La zone solide la plus importante en terme de volume est constituée par le métal de base, c'est-à-dire par les pièces métalliques à assembler. Le métal de base, qui est initialement complètement à l'état solide, est l'une des deux électrodes sur lesquelles repose le principe du soudage à l'arc. Ses dimensions peuvent varier de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres et l'épaisseur de quelques dixièmes de millimètres à plusieurs dizaines de centimètres selon les applications. L'autre partie solide se trouve au niveau du métal d'apport, sous forme de fil solide, qui joue le rôle d'électrode fusible. Il s'agit de la deuxième électrode, le diamètre du fil est de l'ordre du millimètre.

Une atmosphère de protection est utilisée pour protéger la soudure des phénomènes d'oxydation à chaud. La zone de soudage est ainsi alimentée par une colonne de gaz d'une vingtaine de millimètres de diamètre par l'intermédiaire d'une buse. Le gaz peut être inerte (argon, hélium ou mélange des deux) dans le cas du soudage MIG, ou actif (mélange d'argon et généralement de dioxyde de carbone) dans le cas du soudage MAG. Le générateur fournit un courant qui va

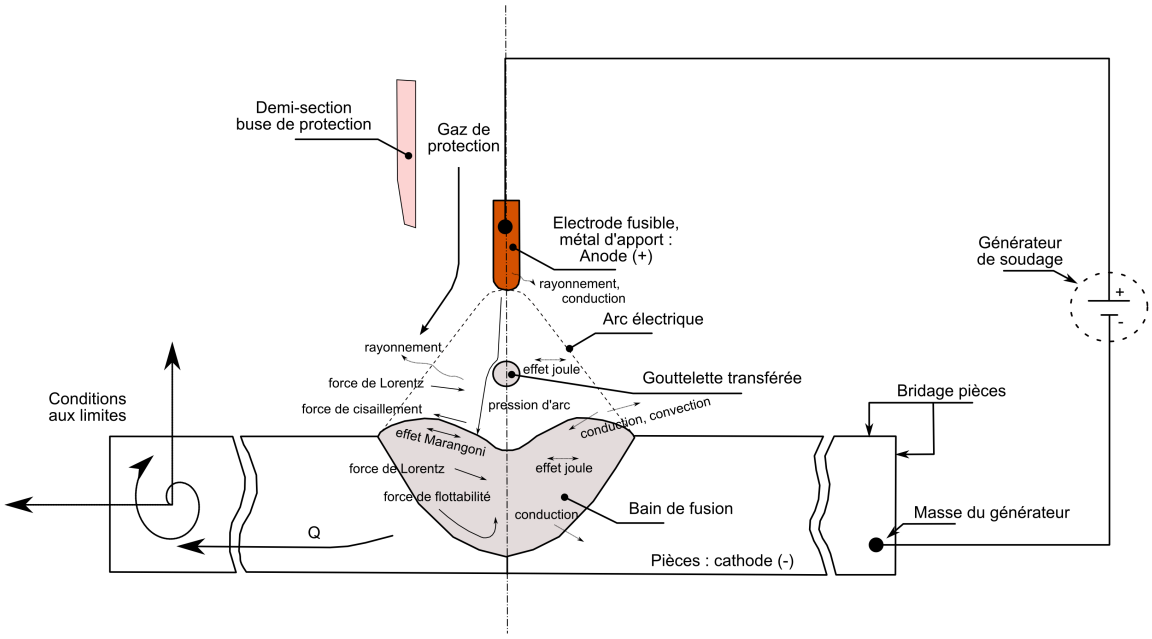


FIGURE 2.1 – Représentation graphique des différentes zones d'intérêts et des différents phénomènes physiques mis en oeuvre au cours d'une opération de soudage de type MIG/MAG.

permettre de créer, au sein de la colonne de gaz, un plasma d'arc entre les deux électrodes qui sont distantes de quelques millimètres.

L'apport de chaleur qui résulte de l'éclairage direct de l'arc entraîne la fusion du métal de base et la formation d'un bain de fusion constitué de métal liquide. La taille de ce bain de fusion est de l'ordre du centimètre en surface. Le bain de fusion est en outre alimenté par les gouttelettes de métal liquide, de tailles millimétriques, issues de la fusion du métal d'apport. En pointe d'électrode coexistent donc du métal d'apport en phase solide et en phase liquide.

De la coexistence de ces différentes phases résulte un grand nombre d'interfaces. Les interfaces vont être le siège des différents mécanismes de transferts : au niveau des interfaces liquide-gaz, entre les gouttelettes et le plasma et entre le bain de fusion et le plasma, au niveau des interfaces liquide-solide, entre le bain de fusion et le métal de base et entre la gouttelette et le fil solide de métal d'apport. La coexistence de ces phases se traduit aussi par l'existence d'une ligne triple au niveau de la périphérie du bain de fusion (ligne de contact métal de base solide, bain de métal liquide et plasma) et au niveau de la liaison gouttelette de métal fondu et fil d'apport solide, en contact avec le plasma. Le comportement de ces lignes triples va être important dans la compréhension des mécanismes de détachement de gouttelettes et donc de transfert et dans les problématiques de mouillage et de qualité finale des cordons soudés.

La diversité d'échelles spatiales, illustrée par les longueurs caractéristiques citées précédemment, s'accompagne d'une large gamme d'échelles temporelles. L'opération de soudage peut mobiliser des phénomènes très rapides, comme les cycles de courant/tension qui peuvent se dérouler à des fréquences de plusieurs centaines de Hertz, engendrant des détachements de gouttelettes tous les centièmes de seconde. La surface du bain de fusion va ainsi être perturbée sur des temps très courts, du même ordre de grandeur. Les mouvements liquides au sein du bain de fusion peuvent donc être très rapides, avec des vitesses pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres par seconde.

Au niveau du procédé, les vitesses d'avance du fil de métal d'apport sont généralement

comprises entre 3 et 9 mètres par minute, tandis que la vitesse de soudage (vitesse d'avance relative torche de soudage/pièce) est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres par minute. Les vitesses de changement de phase au niveau du bain fondu sont globalement du même ordre de grandeur pour la fusion à l'avant du bain liquide et la solidification à l'arrière du bain. L'interface solide-liquide au niveau du bain de fusion peut être relativement diffuse à cause de l'existence d'une zone pâteuse selon les compositions chimiques des matériaux employés.

La montée en température de la pièce métallique peut prendre plusieurs minutes. Le refroidissement et la mise en place des contraintes résiduelles et des déformations, conditionnées par les choix opératoires et les conditions de bridage, sont des phénomènes relativement lents à l'échelle du soudage et peuvent durer plusieurs minutes ou heures selon la taille des assemblages réalisés.

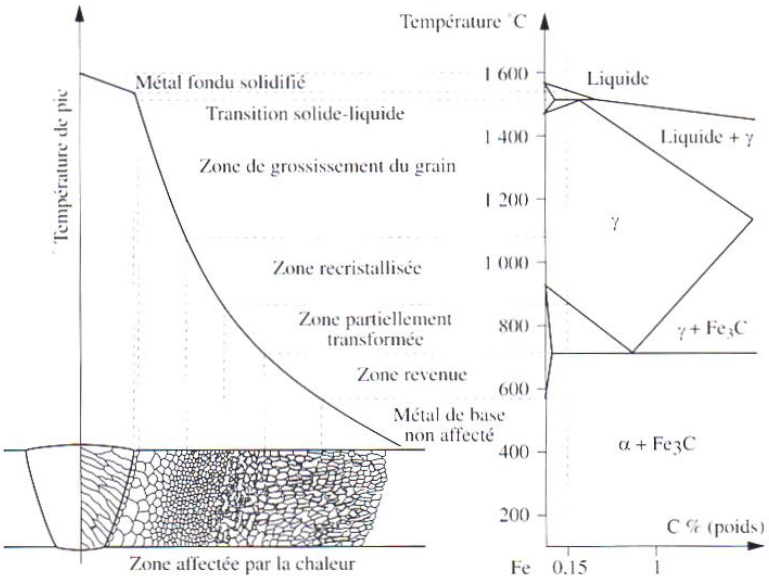


FIGURE 2.2 – Mise en relation des températures et des différentes zones obtenues après soudage à travers le diagramme Fe-C [**?**]

Une large échelle existe également au niveau des températures observées dans les différents domaines. Le plasma, qui interagit avec le fil d'apport, les gouttelettes en transfert et le bain liquide, peut par exemple atteindre près de 20000 K selon la nature du gaz et les énergies de soudage utilisées. Les températures ne sont pas homogènes au sein d'un même domaine. Des gradients thermiques importants apparaissent ainsi au niveau du fil d'apport qui passe de la température ambiante à une température supérieure au liquidus en quelques centimètres. De tels gradients existent aussi au niveau des pièces à assembler et sont sources de contraintes résiduelles et de modifications métallurgiques (figure 2.2). A l'issue de l'opération de soudage, trois zones peuvent être distinguées au sein du solide : la zone de métal fondu, la zone de métal affecté thermiquement (appelée ZAT) et le métal de base qui n'a pas été affecté de quelque façon que ce soit. Des gradients thermiques existent aussi au niveau du bain de fusion : l'interface solide-liquide correspond à une température de liquidus (de l'ordre de 1700 K) tandis que le coeur du bain fondu peut atteindre des températures voisines de 3000 K.

Comme le laisse percevoir cette première analyse d'une opération de soudage, il s'agit d'une opération particulièrement riche d'un point de vue des phénomènes physiques. Parmi les différents champs disciplinaires, sont principalement importants en soudage :

— la physique de l'arc et du plasma, l'électromagnétisme,

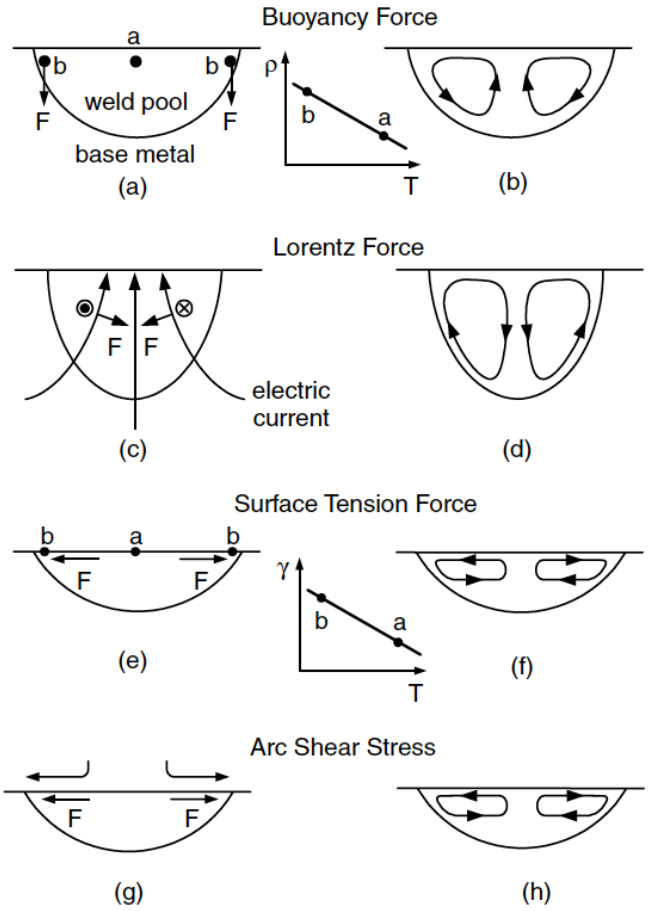


FIGURE 2.3 – Forces participant aux mouvements de convection du bain de soudage : (a,b) force résultant de la variation de la masse volumique avec la température et de l'action de la gravité (hypothèse de Boussinesq), (c,d) force de Lorentz (effet électromagnétique), (e,f) effet de la tension de surface, (g,h) effet du flux gazeux [**?**].

— les transferts thermiques et de masse,
— la mécanique des fluides,
— la mécanique du solide,
— la physique du matériau, la métallurgie...

L'étude théorique du soudage à l'arc passe donc par la prise en compte des équations de Maxwell (ou des modèles électromagnétiques simplifiés), des équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie et l'étude de forces aussi diverses que les forces de Lorentz, les forces de frottement et de pression de l'arc sur le bain liquide, les effets de gravité, la force de tension de surface...

La richesse de ces phénomènes et de leurs possibles couplages s'expriment plus particulièrement au niveau des interfaces. Une bonne illustration en est fournie par la surface du bain de fusion qui est directement soumise à l'apport de chaleur du plasma d'arc et aux flux d'électrons, mais pas seulement. Cette interface est aussi le siège des transferts de masse, de chaleur et de quantité de mouvement amenées par les gouttelettes de métal liquide issues de la fusion du fil d'apport. L'apport d'éléments chimiques contenus dans le gaz de protection se fait aussi au travers de la surface du bain de fusion qui est de plus soumise aux actions mécaniques de pression d'arc et de cisaillement sous l'effet du flux de gaz.

Ces phénomènes interfaciaux ont clairement des répercussions sur le comportement des dif-

férentes zones liquides. Le bain de fusion est ainsi le siège de forces de types surfaciques ou volumiques, et antagonistes comme le montre la figure 2.3. Certaines forces ont tendance à favoriser l'étalement du bain, d'autres au contraire à le rendre plus pénétrant. Sous l'action de ces forces, des cellules de convection se créent à l'intérieur du bain, participant ainsi à la circulation de la chaleur et au brassage des éléments chimiques. La forme du bain de fusion, et par la suite du cordon de soudure, est donc le résultat d'une compétition entre des phénomènes mis en oeuvre en surface et au coeur du métal liquide.

La compréhension des mécanismes mis en jeu dans l'opération de soudage nécessite donc l'identification des phénomènes prépondérants et l'accès à des grandeurs rendant compte de leur diversité : mesures de type procédé (courant et tension de soudage, vitesse fil, vitesse de soudage), efforts de bridage, températures (ponctuelles et champs de température), grandeurs géométriques (tailles de bain de fusion ou de gouttes), vitesses (de transfert ou d'écoulements liquides)...

Ce constat nous a conduit à développer une approche expérimentale globale, adaptée aux contraintes inhérentes au soudage à l'arc.

2.2 Une approche expérimentale, adaptée au soudage à l'arc

Principales communications et publications : [?, ?, ?]

La place importante accordée à l'expérimentation est une spécificité forte de notre équipe de recherche.

2.2.1 Positionnement

Avec l'augmentation des capacités de calculs de ces dernières décennies, la simulation numérique constitue un axe de recherche très souvent utilisé pour l'étude des problématiques liées au soudage. De nombreux aspects tels que la prise en compte des couplages entre différents phénomènes ou la sensibilité aux paramètres peuvent être abordés dans des configurations de plus en plus réalistes. Les simulations les plus récentes permettent ainsi de prendre en compte des configurations multiphysiques, tridimensionnelles, avec surface libre au niveau du bain de fusion, des méthodes inverses pour l'identification des sources de chaleur ou des modèles numériques intégrant à la fois les écoulements liquides dans le bain et la gestion de la solidification [?, ?, ?, ?, ?]. Les outils de simulation numérique permettent de plus d'accéder à des informations difficiles ou impossible à atteindre expérimentalement telles que par exemple les gradients de température dans les zones liquides, les écoulements au coeur du bain de fusion ou encore les gradients de solutés...

Malgré ces forces de la simulation numérique, l'approche expérimentale reste nécessaire et incontournable pour comprendre la réalité des phénomènes, dégager les tendances de comportement, identifier les mécanismes principaux et obtenir des données réelles. Les deux approches sont complémentaires ; l'approche expérimentale permettant à la fois de fournir des données d'entrée et d'apporter des éléments de comparaison pour la validation des résultats de simulations (identification des phénomènes et quantification des grandeurs in-situ). Peu d'équipes de recherche, notamment en France, s'intéressent à la prise en compte expérimentale de la diversité des phénomènes dans les procédés à l'arc. Ce constat nous a conduit depuis quelques années à développer des compétences dans ce domaine, notamment à travers la conception et le développement d'une plateforme expérimentale multiphysique, permettant des mesures synchronisées en cours de soudage à l'arc. La mise en place initiale de cette plateforme a été effectuée au cours de la thèse de Julien Chapuis et au cours de l'ANR TEMMSA [1]. Cette plateforme est évolutive

1. Projet ANR Jeunes Chercheurs "Techniques Expérimentales de Mesures Multiphysiques en Soudage à l'Arc"

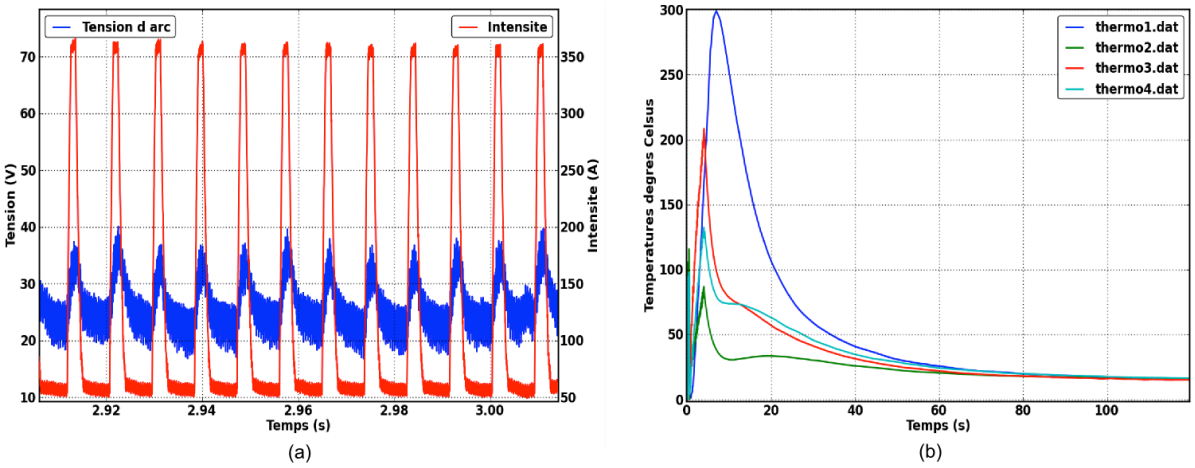


FIGURE 2.4 – Exemple de mesures effectuées en cours de soudage : (a) paramètres procédés tension U et intensité I, (b) températures locales avec des thermocouples de type K.

et des développements complémentaires sont effectués en fonction des besoins. Un exemple des possibilités de mesure de paramètres procédés et de températures est présenté figure 2.4. L'outil expérimental est complété par un système d'archivage des données et des bibliothèques d'analyse des données [2]. Ce positionnement permet de s'inscrire dans une démarche d'échanges et de collaboration avec d'autres équipes de recherche (projet BA3, GDR "Solidification des Alliages Métalliques"...).

Dans ce contexte, je m'intéresse plus particulièrement au comportement des zones liquides en cours de soudage. Les zones liquides se trouvent au coeur du procédé et sont le siège de l'élaboration de la soudure ; leur comportement conditionne la qualité finale des cordons et donc le comportement de la structure soudée. Au-delà de l'intérêt scientifique, la compréhension du comportement de ces zones de métal liquide permet d'envisager l'optimisation future du contrôle des procédés, notamment à travers le contrôle des transferts de matière et d'énergie. Le caractère dynamique de ces zones liquides m'a notamment conduit à mettre en place et à développer des techniques d'imagerie adaptées aux problématiques d'études et aux contraintes des procédés de soudage.

2.2.2 Méthodologie d'étude

Dans mes différentes activités de recherche, que ce soit dans le domaine des milieux granulaires ou celui du soudage à l'arc, ma démarche de travail est basée sur un dialogue croisé expérimentation/théorie.

En amont de l'expérimentation, la prise en compte des problématiques physiques et des modèles théoriques permet d'identifier les grandeurs pertinentes pour l'étude et qui vont conditionner la conception des expériences et des dispositifs expérimentaux associés. L'objectif est de pouvoir réaliser des expériences les plus simples possibles permettant d'effectuer des mesures in-situ, en configuration de laboratoire mais avec l'optique d'une potentielle utilisation ultérieure de certains dispositifs en ingénierie ou en milieu industriel (pour la mesure et/ou le contrôle par exemple).

Les données qualitatives et quantitatives obtenues sont ensuite analysées pour essayer de hiérarchiser les mécanismes mis en oeuvre, identifier les phénomènes principaux et ainsi essayer de faciliter la modélisation. L'analyse des résultats expérimentaux est réalisée, quand c'est possible, par confrontation à des modèles théoriques construits à partir des équations de conservation, des

pilotée par Cyril Bordreuil et impliquant l'ensemble de l'équipe AS

2. BAME et erCV

conditions aux frontières et des modèles physiques. C'est par exemple le cas des études réalisées sur la cohésion par capillarité dans les milieux granulaires non saturés et la prise en compte d'une cohésion évolutive. Dans certaines situations, la complexité des phénomènes et de leurs couplages peut rendre difficile la mise en oeuvre d'une analyse basée sur les équations de conservation et les conditions aux frontières des différents domaines ou des phases. C'est notamment le cas pour les phénomènes mobilisés au niveau de la ligne triple, particulièrement dans le cas des configurations non-isothermes telles que celles rencontrées en soudage. L'analyse dimensionnelle offre alors des possibilités d'études qui me paraissent particulièrement intéressantes. Basée sur une approche classique [**?**,**?**], dans les situations complexes, elle apporte des éléments de description indispensables pour la détermination des grandeurs à prendre en compte pour la conception des expériences et une démarche d'étude permettant l'analyse des résultats expérimentaux et la formulation de "modèles" décrivant les principales tendances de comportement. C'est d'ailleurs la démarche principale d'analyse qui a été utilisée pour étudier le dépôt de métal liquide et le comportement au mouillage en situation non-isotherme dans le cadre de la thèse de julien Chapuis (voir section 3.2).

Au-delà de l'intérêt scientifique, l'objectif de cette démarche de travail est aussi de pouvoir proposer, à terme, des outils d'étude et d'analyse utilisables en ingénierie.

2.2.3 Un milieu d'étude spécifique

En soudage à l'arc, comme évoqué précédemment, la diversité des grandeurs physiques à mesurer et la diversité des échelles spatiales et temporelles auxquelles les phénomènes physiques se manifestent rendent l'étude expérimentale délicate, notamment en terme d'échantillonnages et de synchronisation des mesures.

A ces contraintes d'ordre physique s'ajoutent des contraintes techniques liées au procédé lui-même. Le soudage à l'arc est en effet basé sur une continuité de circuit électrique dont la fermeture est assurée par l'arc électrique par lequel transitent des courants et tensions pouvant être élevés (plusieurs centaines d'ampères et de volts), à des fréquences de plusieurs centaines de Hertz voire plusieurs milliers dans les phases d'amorçage. Au-delà des forts courants électriques pouvant transiter dans les pièces métalliques, ces phénomènes électriques sont sources de champs électrostatiques et électromagnétiques qui perturbent les dispositifs de mesure. Des dispositions particulières (isolation multicouches des cartes électroniques, opto-couplage des voies, blindage des câbles...) ont donc dues être mises en oeuvre au niveau de notre plateforme expérimentale pour protéger les systèmes de mesure dont beaucoup utilisent de très faibles courants et tensions et sont en contact direct avec les pièces métalliques à assembler (cas des thermocouples par exemple).

L'apport de métal à l'état liquide au niveau du bain de fusion est source de projection de métal en fusion sous forme de gouttes, de façon plus ou moins erratique, ce qui peut endommager les dispositifs de mesure. Le plasma d'arc est un système rayonnant, dont le spectre d'émission balaie une large gamme de longueurs d'onde, depuis les ultra-violets jusqu'aux infrarouges. Le spectre d'émission peut être très variable car fortement lié à la nature des matériaux en présence (métal de base, métal d'apport et gaz de protection) mais aussi à l'énergie de soudage. Le spectre peut donc varier significativement au cours d'une même opération de soudage. De plus, l'apport de chaleur fourni par le plasma d'arc au niveau de la surface du bain de fusion est à l'origine de la vaporisation de certains composés chimiques [**?**, **?**]. L'observation du bain de fusion et des transferts nécessite donc la mise en place de dispositifs spécifiques qui permettent de tenir compte de ces spectres d'émission dont un exemple est donné figure 2.5.

L'observation des zones liquides en cours de soudage nécessite l'utilisation de caméras numériques rapides qui permettent d'observer, et d'analyser, des phénomènes au caractère dynamique très marqué. Les mesures que nous avons pu effectuer montrent par exemple des fréquences de transfert métallique de près de 115 Hz, avec des vitesses de chute de gouttelettes métalliques voisines de 0,5 m/s ou des vitesses d'écoulement en surface de bain liquide pouvant atteindre

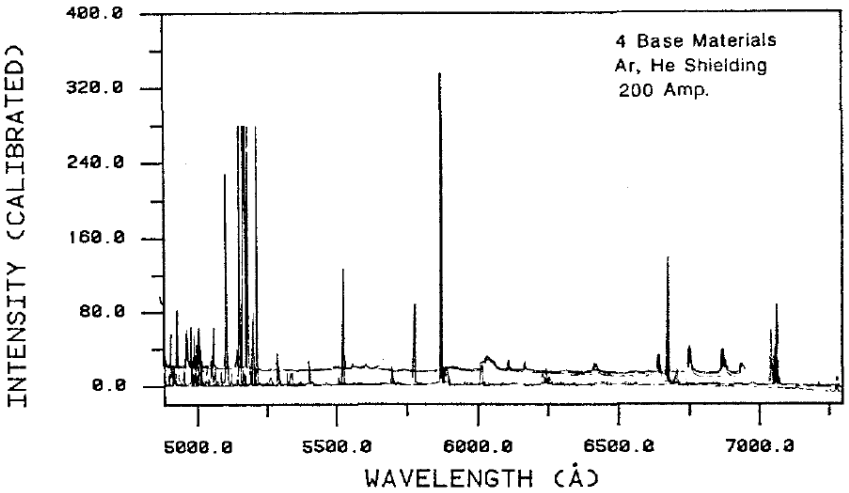


FIGURE 2.5 – Fenêtre du spectre observé en soudage TIG avec un gaz de protection Argon-Hélium et une intensité de soudage de 200 A [?].

80 mm/s... Pour s'affranchir des contraintes liées à la présence du plasma d'arc, les dispositifs d'imagerie peuvent être équipés de filtres et complétés par des systèmes d'éclairage de type halogène ou diode laser.

Les différents travaux menés par notre équipe m'ont conduit à mettre en place et à développer des techniques d'imagerie variées, pour certaines relativement "classiques", pour d'autres plus spécifiques, comme par exemple :

— observation par réflexion spéculaire pour l'étude de la croissance du bain de fusion en soudage TIG, figure 2.6 (thèses de Julien Chapuis et de Sreedhar Unnikrishnakurup),
— ombroscopie pour l'étude des transferts en soudage MIG-MAG (thèses de Julien Chapuis et de Romain Monier),
— microscopie avec vidéo rapide pour l'étude de la solidification et de la croissance dendritique (thèse d'Alexis Chiocca),
— séparation de faisceau et filtrage interférentiel différencié sur une même scène, au même instant, pour la réalisation mesure de champs de température par pyrométrie bichromatique sur les zones liquides en soudage MIG-MAG (thèse de Romain Monier),

Le premier objectif de ces observations est de pouvoir décrire qualitativement le comportement des différentes zones d'intérêt, comme l'illustre le cas du humping présenté au paragraphe 1.3.2. Le deuxième objectif est d'obtenir des informations quantitatives, de façon localisée ou plus globale, avec par exemple des mesures de champs. La prise en compte des informations qualitatives et quantitatives, à travers des modèles physiques et des études dimensionnelles, permet d'identifier les phénomènes majeurs. Ces informations peuvent de plus fournir des données d'entrée pour les simulations numériques et apporter des éléments de comparaison pour leur validation.

2.2.4 L'exemple du bain de fusion en soudage TIG

PRINCIPALES COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS : [?]

L'approche expérimentale est complémentaire des études numériques et permet de mettre en place des études basées sur la simulation numérique couplée à des essais expérimentaux, comme dans le cas des travaux de thèse de Sreedhar Unnikrishnakurup [?]. Au cours de ces travaux, Sreedhar Unnikrishnakurup a étudié le comportement du bain de fusion et l'estimation des paramètres de source de chaleur par une approche inverse. Les simulations numériques ont été réalisées en éléments finis avec une modélisation classique de l'opération de soudage TIG [?].

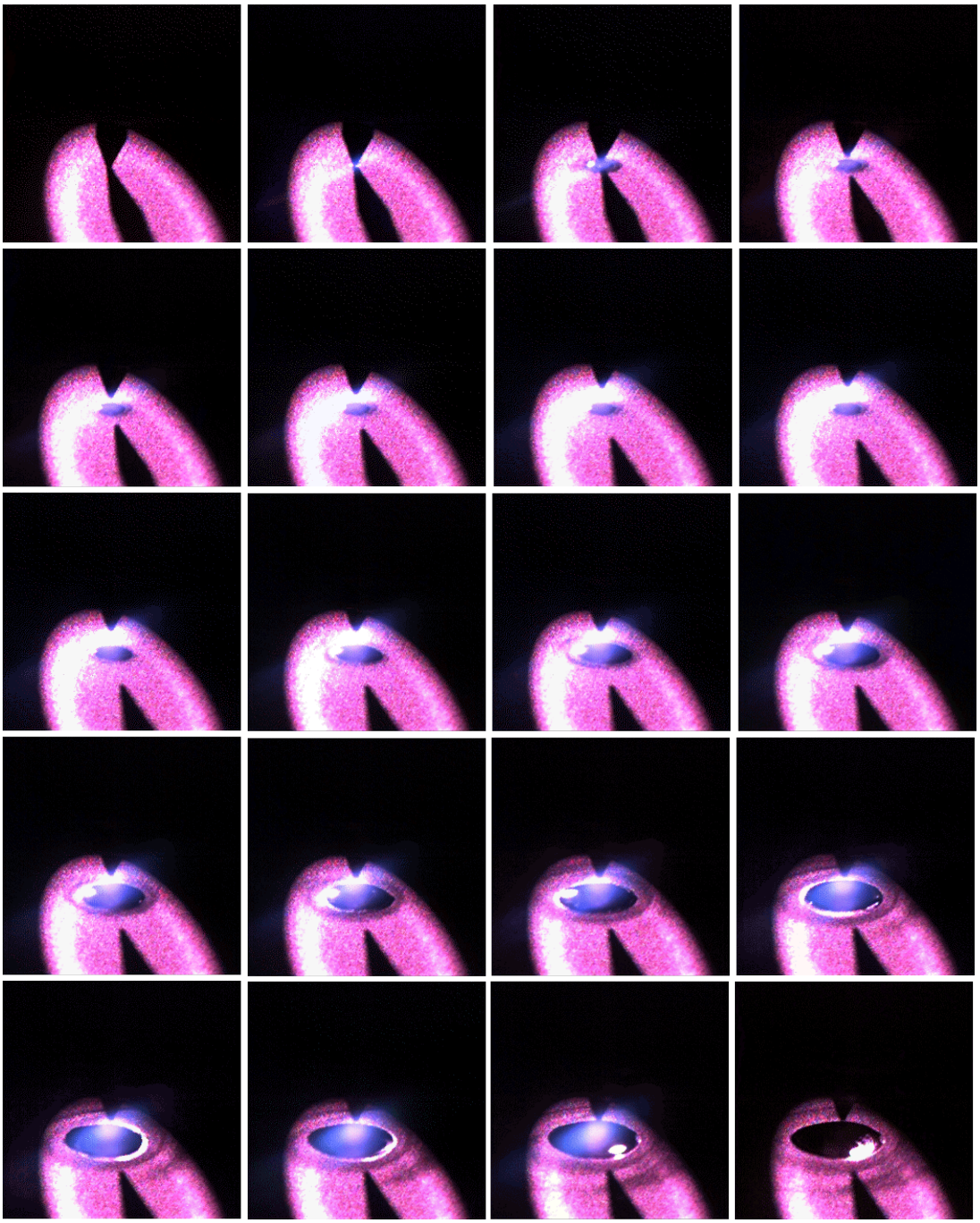


FIGURE 2.6 – Croissance du bain de fusion au cours d'une opération de soudage TIG statique (chronologie : lecture de gauche à droite et de haut en bas). L'électrode est initialement en contact avec la cible métallique. En effet, l'amorçage de l'arc est effectué par "contact-retrait" ou "lift arc", pour éviter les problèmes de champs générés par l'amorçage HF qui génèrent des perturbations dans le processus de mesure. Observation par réflexion spéculaire ; éclairage par diode laser 808 nm, fitrage interférentiel passe bande et caméra Phantom v5.0.

L'approche expérimentale a contribué dans un premier temps à définir le cadre de modélisation. Le choix s'est porté sur une configuration de soudage TIG statique sans métal d'apport en configuration axisymétrique. Même si peu réaliste industriellement, le soudage TIG statique est une situation d'étude intéressante car cette configuration permet de limiter le nombre de mécanismes mis en oeuvre : cette situation mobilise essentiellement l'apport d'énergie et les transferts thermiques, il n'y a pas d'effet lié à la vitesse de soudage ni de transfert de matière. La configuration axisymétrique, qui permet de simplifier le cadre de modélisation numérique, est expérimentalement contrôlée et validée par la caractérisation de la forme du bain de fusion et des mesures de température dans le métal de base. Les essais expérimentaux ont aussi permis de vérifier l'hypothèse de surface horizontale pour la modélisation de la surface du bain de fusion, les observations en cours de soudage ne montrant que de très faibles déformations pour du soudage en courant lisse avec des intensités n'excédant pas 150 A dans cette étude. L'influence relative des forces de Lorentz et de tension de surface peut être appréhendée grâce au nombre de Bond magnétique :

$$Bo_m = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 R\gamma} \tag{2.1}$$

avec $\mu_0 = 1.25663706 \times 10^{-6}$ m.kg.s^{-2}.A^{-2} la perméabilité du vide, I l'intensité de soudage et γ=1.934 N.m^{-1} une valeur moyenne de la tension de surface pour le matériau mis en oeuvre. Pour toutes les configurations de soudage étudiées par Sreedhar Unnikrishnakurup, le nombre de Bond magnétique est inférieur à 1. De plus, pour les tailles de bain supérieures au millimètre, le nombre Bo_m diminue d'un ordre de grandeur, devenant inférieur à 0,1 traduisant ainsi le fait que l'effet des forces de Lorentz est négligeable devant les effets de tension de surface. La contribution des forces de Lorentz sur le comportement du bain de fusion ne se manifeste donc que durant la phase rapide de formation du bain de fusion, les forces de tension de surface et de thermo-convection de type Marangoni devenant rapidement prépondérantes. Ces travaux ont permis d'étudier l'importance relative de différents phénomènes intervenant dans la définition de la taille et de la forme du bain de fusion, et notamment le rôle de l'énergie de soudage (figure 2.7).

Les essais expérimentaux permettent aussi d'évaluer a posteriori la qualité des résultats de simulation numérique. L'observation de l'évolution du bain liquide en cours de soudage est un exemple intéressant qui donne accès à la cinétique de croissance du bain de fusion. La figure 2.8 permet ainsi de comparer l'évolution des cinétiques de croissance du bain de fusion obtenues à partir d'observation en imagerie rapide au cours d'essais et de résultats de simulation numérique réalisés dans dans des conditions similaires.

L'intégration d'une approche expérimentale en complément de la simulation numérique permet, au-delà des aspects de validation, d'évaluer l'importance des différents mécanismes mis en oeuvre et de préciser les modèles à considérer pour les simulations numériques.

Les phénomènes d'interfaces et les problématiques de tension de surface et de mouillage qui s'y rapportent tiennent une place importante dans le comportement des zones de métal liquide, leur rôle est discuté plus en détail au chapitre 3.

2.3 Conclusion

Le soudage à l'arc constitue un domaine de recherches expérimentales particulièrement riches et l'instrumentation des opérations de soudage constitue assez souvent un défi technique qu'il est intéressant de relever pour s'affranchir des contraintes spécifiques de ces procédés.

Le développement relativement récent des capteurs numériques dédiés à l'imagerie offre des possibilités d'observations et de mesures difficilement accessibles jusqu'à présent et permet d'envisager des développements permettant d'étudier plus en détail les couplages entre les différents phénomènes physiques. Ces possibilités sont notamment mises en oeuvre dans le chapitre suivant

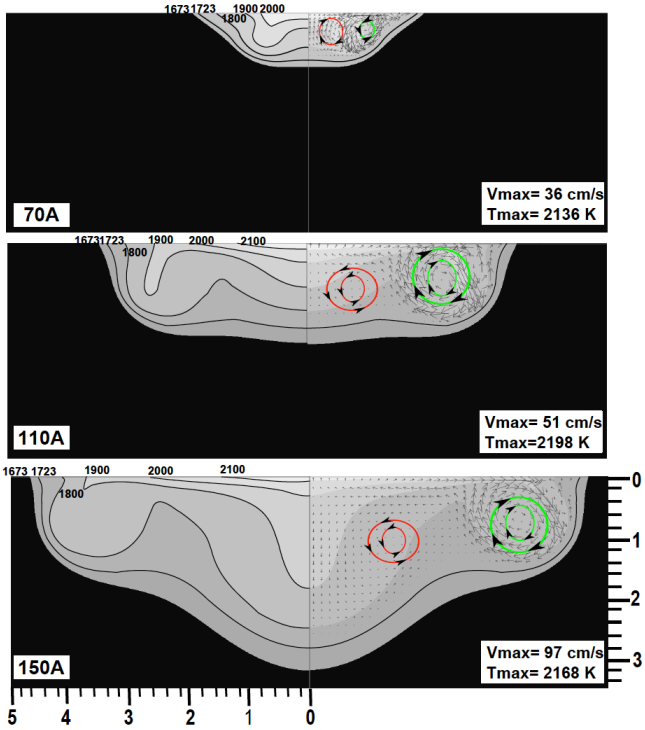


FIGURE 2.7 – Profils des bains de fusion, champs de températures et de vitesses pour différentes intensités de soudage, en configuration de soudage TIG statique [**?**]. Les échelles de longueur sont indiquées en millimètres et les isothermes de température en Kelvin.

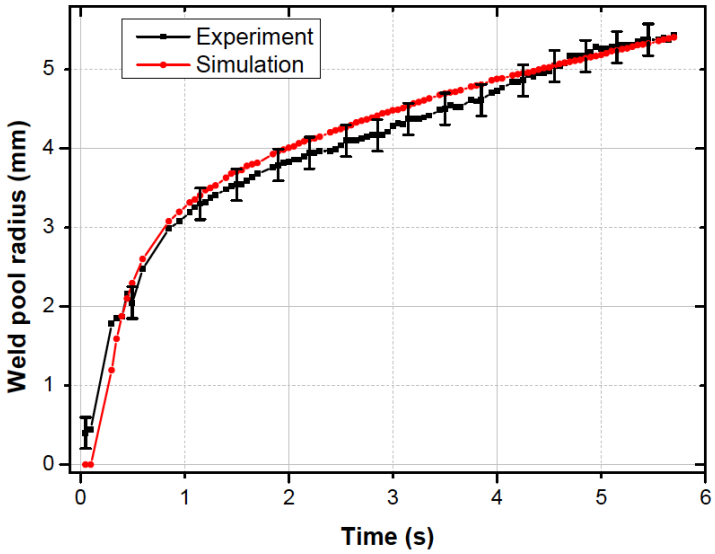


FIGURE 2.8 – Evolution comparée de la taille du bain de fusion au cours de l'opération de soudage, pour une intensité de soudage de 150 A, en configuration de soudage TIG statique [**?**].

pour appréhender le comportement des différentes phases liquides et interfaces en prenant en compte leur caractère dynamique. L'approche proposée, basée sur l'expérimentation et l'analyse dimensionnelle, permet d'identifier les mécanismes prépondérants.

Chapitre 3

Phénomènes d'interfaces en soudage à l'arc

Les interfaces en lien avec les zones liquides occupent une place importante en soudage à l'arc. Des travaux de recherche plus particulièrement axés autour des effets de tension de surface et de mouillage ont permis de mieux appréhender l'importance des phénomènes interfaciaux sur le comportement des zones liquides. Ce chapitre présente quelques uns de ces axes de travail, dont les études expérimentales s'appuient sur l'approche expérimentale présentée au chapitre 2. L'objectif de ces études est de qualifier les phénomènes physiques mis en oeuvre et de quantifier les grandeurs associées in-situ. L'analyse des résultats, à travers par exemple l'utilisation de modèles théoriques ou par des approches dimensionnelles, a notamment pour objet d'appréhender les principaux phénomènes en relation avec les paramètres liés à l'opération de soudage.

3.1 Thermocapillarité

L'énergie de soudage a un rôle essentiel dans la taille du bain de fusion mais aussi dans sa forme globale à travers les phénomènes interfaciaux qui s'y développent.

L'opération de soudage fait apparaître des gradients thermiques horizontaux qui engendrent eux-mêmes des gradients de tension superficielle à la surface du bain de fusion. Ces gradients de tension superficielle au niveau de l'interface liquide-gaz sont des forces motrices importantes dans les mouvements liquides au sein du bain de fusion. Ces forces conduisent à l'apparition de cellules de convection qui conditionnent la forme du bain liquide. Ce phénomène, qui s'apparente à l'instabilité de Bénard-Marangoni, traduit une convection thermocapillaire, de type Marangoni. Le nombre de Marangoni Ma représente le rapport des forces de tension de surface sur les forces de viscosité et traduit l'importance de la convection de type thermocapillaire (figure 3.1) :

$$Ma = \frac{\rho c_p R \frac{d\gamma}{dT}(\Delta T)}{k\mu} \tag{3.1}$$

dans cette définition, R correspond au rayon du bain (longueur caractéristique), ρ est la masse volumique, c_p la chaleur spécifique, k la conductivité thermique, μ la viscosité et $\Delta T = T_m - T_s$ avec T_m la température maximale à la surface du bain et T_s la température du solidus. Le gradient de tension superficielle $\frac{d\gamma}{dT}$ est calculé en utilisant les relations proposées par Sahoo et al. [**?**].

Le bain de fusion est également le siège de gradients thermiques verticaux qui peuvent engendrer des mouvements liquides au coeur du bain de fusion. Ce phénomène thermo-convectif, de type Rayleigh-Bénard, est lié aux effets différents de la poussée d'Archimède résultant des variations de densité du métal liquide dues aux hétérogénéités de température dans le bain de fusion. Le nombre de Rayleigh Ra représente le rapport des forces de flottabilité sur les forces de viscosité et traduit l'importance de cet effet thermo-convectif (figure 3.1) :

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T R^3}{\nu \alpha} \tag{3.2}$$

où β correspond au coefficient volumique de dilatation thermique, g à la gravité, ν à la viscosité cinématique et α à la diffusivité thermique.

Dans le cas du soudage, où les écoulements dans le bain liquide peuvent être influencés conjointement par des gradients de densité et par des gradients de tension superficielle, il peut être intéressant de considérer le nombre de Bond dynamique qui permet de comparer les effets relatifs de la convection thermocapillaire et de la convection thermogravitaire (figure 3.2) :

$$Bd = \frac{Ra}{Ma} = \frac{\beta \rho g R^2}{\frac{d\gamma}{dT}} \tag{3.3}$$

La figure 3.1 présente l'évolution comparée des nombres de Marangoni et de Rayleigh pour différentes simulations de soudage étudiées par Sreedhar Unnikrishnakurup [**?**]. Pour les valeurs du nombre de Marangoni de l'ordre de 10^3, correspondant à des bains de fusion de faibles tailles (de l'ordre du millimètre), les bains de fusion sont de forme hémisphérique. Le transfert d'énergie à travers le bain s'effectue principalement par conduction. Lorsque le nombre de Marangoni augmente d'un ordre de grandeur, les forces de tension de surface et l'effet Marangoni prennent un rôle prédominant dans l'étalement du bain de fusion et dans le transfert d'énergie, et les formes des bains de fusion changent. Des points d'inflexion apparaissent au niveau des interfaces solide-liquide et le profil du bain initialement hémisphérique prend une forme convexe voire concave, en fonction des cellules de convection qui se développent en son sein, avec apparition possible d'instabilités. Les effets thermogravitaires augmentent assez logiquement avec la taille du bain de fusion, mais restent dans des ordres de grandeur inférieurs à ceux des effets thermocapillaires. Le fait que le nombre de Bond dynamique reste globalement inférieur à 1 traduit cette prédominance de la convection de type Marangoni (figure 3.2). Les singularités qui apparaissent dans les courbes du nombre de Marangoni, et donc du nombre de Bond dynamique, peuvent traduire l'apparition de cellules de convection à sens de circulation opposés, en relation avec l'existence d'une température critique conduisant à l'inversion des gradients de tension superficielle à la surface du bain de fusion.

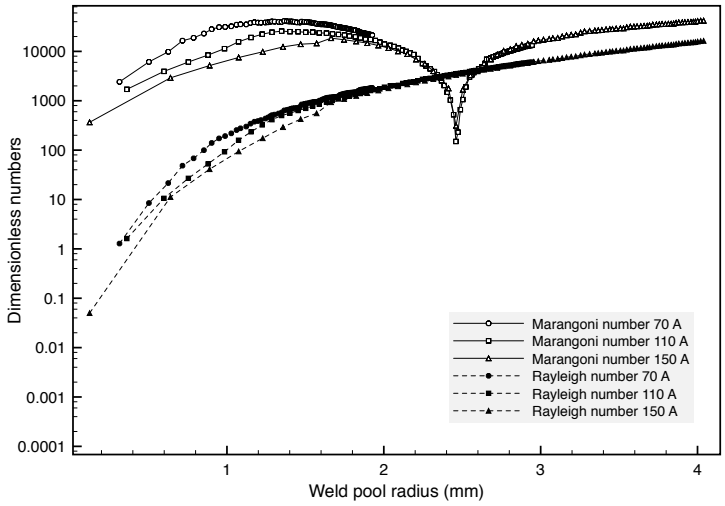


FIGURE 3.1 – Évolution comparée des nombres de Rayleigh et de Marangoni au cours de la croissance du bain de fusion en soudage TIG statique, pour trois énergies de soudage différentes. Les données de températures en surface du bain de fusion sont issues de simulations numériques [**?**].

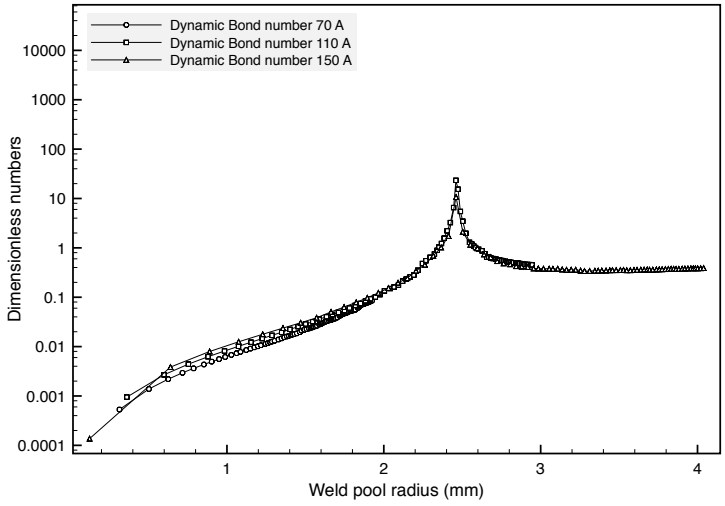


FIGURE 3.2 – Évolution du nombre de Bond dynamique au cours de la croissance du bain de fusion en soudage TIG statique, pour trois énergies de soudage différentes. Les données de températures en surface du bain de fusion sont issues de simulations numériques [**?**].

Outre la grande sensibilité aux gradients thermiques, la tension de surface est également fortement influencée par la variation de composition chimique des matériaux utilisés au cours de l'opération de soudage. Pour une configuration de soudage identique, une modification, même faible, de la teneur en éléments tensioactifs a des répercussions sur les gradients de tension de surface qui entraînent des modifications d'écoulements au sein du bain de fusion et donc une forme de bain de fusion différente in fine. Par exemple, l'effet de la teneur en soufre (variation de quelques ppm) est perceptible aussi bien expérimentalement qu'avec des simulations numériques (figure 3.3). L'augmentation de la teneur en soufre du métal de base permet ainsi d'obtenir des bains plus pénétrants. Cet effet de la composition chimique sur l'effet Marangoni peut d'ailleurs être spécifiquement mis en oeuvre dans des procédés de soudage tels que le A-TIG [**?**].

3.2 Étalement et comportement au mouillage

PRINCIPALES COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS : [**?**, **?**]

Le dépôt de liquide sur un substrat solide est une opération importante qui trouve des applications dans des activités industrielles aussi diverses que l'impression jet d'encre, le revêtement de surface ou la fabrication directe. Le comportement du dépôt est conditionné par la compétition entre des forces volumiques (champs de pesanteur ou électro-magnétiques) et des phénomènes interfaciaux avec notamment des effets caractérisés par la tension de surface et l'angle de mouillage. Le mouillage et l'étalement du liquide sur le solide sont directement liés au comportement de la ligne triple et de l'angle de mouillage. Dans le cas du soudage à l'arc, le dépôt de métal liquide s'effectue en configuration non-isotherme en régime transitoire, liée à la présence de forts gradients thermiques et à un apport régulier de matière en fusion.

Afin d'appréhender le comportement du métal liquide, une étude expérimentale de dépôt a été développée au cours de la thèse de Julien Chapuis [**?**]. Le principe de l'essai est basé sur une opération de soudage statique en soudage MIG/MAG pulsé. Le dépôt de gouttelettes de métal liquide sur une cible métallique permet la création d'une "macro-goutte" de métal liquide (figures 3.4 et 3.5). L'électrode fusible alimente la macro-goutte en métal liquide grâce au transfert de gouttelettes de métal en fusion d'environ 1 mm de diamètre à une fréquence de 113 Hz. Les différentes caractéristiques physiques prises en compte dans ces travaux sont données dans le

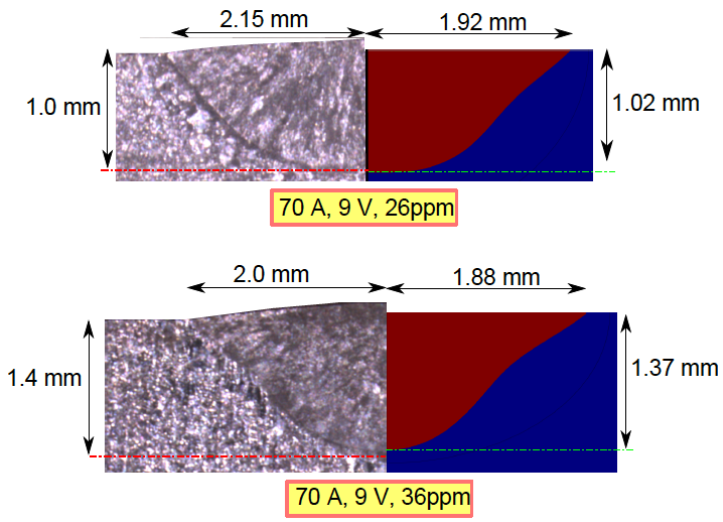


FIGURE 3.3 – Bains de fusion obtenus expérimentalement (profils de gauche) et numériquement (profils de droite) dans des conditions de soudage identiques, pour deux teneurs en soufre différentes au niveau du métal de base. Soudage TIG statique sur 304L [**?**].

tableau 3.1.

	Properties (units)	Values
γ	surface tension $(N.m^{-1})$	1.67
ρ	density $(kg.m^{-3})$	7200
ρ_s	density of the solid $(kg.m^{-3})$	7800
μ	viscosity $(kg.m^{-1}.s^{-1})$	0.006
c_p	specific heat $(J.kg^{-1}.K^{-1})$	753
c_{ps}	solid specific heat $(J.kg^{-1}.K^{-1})$	753
T_f	fusion temperature (K)	1798
L	enthalpy of melting$(J.kg^{-1})$	2.77×10^5
λ	thermal conductivity $(W.m^{-1}.K^{-1})$	26
λ_s	solid thermal conductivity $(W.m^{-1}.K^{-1})$	26

TABLE 3.1 – Grandeurs physiques et valeurs numériques correspondantes (supposées constantes).

Dans cette configuration complexe, le comportement du dépôt de métal liquide sur le substrat solide est appréhendé à travers l'évolution de l'étalement de la macro-goutte défini par le rayon de base $R(t)$. Une analyse dimensionnelle a été proposée pour identifier les principaux phénomènes et paramètres procédés qui participent à l'étalement et au mouillage et essayer d'en proposer une première modélisation. Une première analyse a permis de définir les variables d'études qui semblent les plus pertinentes. Cette analyse a montré que l'évolution du rayon de base peut être décrite en fonction de paramètres procédés et de caractéristiques matériaux :

$$R(t) = f(P, v_d, r, \Delta T, \gamma, \rho, \lambda, c_p, t) \tag{3.4}$$

avec :
- la puissance de soudage P
- la quantité de matière apportée au système macro-goutte par unité de temps v_d
- le rayon des gouttelettes de métal liquide r
- la différence de température $\Delta T = T_f - T_0$ entre la macro-goutte liquide (supposée égale à la température de fusion T_f) et le substrat solide (initialement à la température T_0)

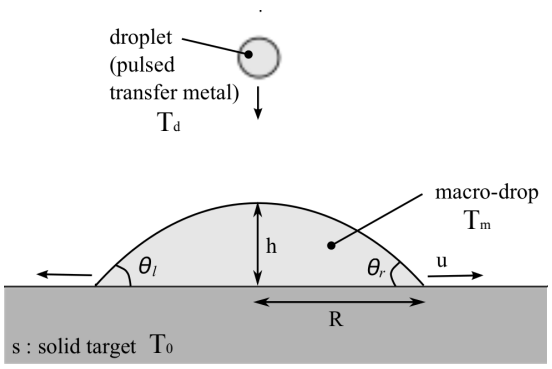


FIGURE 3.4 – Dépôt de métal liquide et étalement de la macro-goutte au cours d'une opération de soudage MAG statique. L'apport de matière s'effectue à travers le détachement et la chute de gouttelettes de métal en fusion de rayon r. La géométrie de la macro-goutte est définie par sa hauteur h, le rayon de base R qui décrit la longueur de base et les angles de contact θ au niveau de la ligne triple. La vitesse d'étalement u correspond à la vitesse de déplacement de la ligne triple. Les températures des différents éléments sont notées T.

— la tension superficielle γ
— la masse volumique ρ
— la conductivité thermique λ
— la chaleur spécifique c_p
— le temps t (échelle de temps définie sur la durée de l'expérience)

Une analyse dimensionnelle, basée sur une approche classique de type Buckingham-π [**?**,**?**], a été mise en oeuvre pour déterminer les paramètres adimensionnels Π_i nécessaires à la description de l'étalement. Plusieurs groupes adimensionnels ont été identifiés, et notamment :

$$\Pi_1 = \frac{R\rho c_p^{1.5}\sqrt{\Delta T}}{\lambda} \tag{3.5}$$

$$\Pi_2 = \frac{r\rho c_p^{1.5}\sqrt{\Delta T}}{\lambda} \tag{3.6}$$

$$\Pi_3 = \frac{v_d\rho^2 c_p^{2.5}\sqrt{\Delta T}}{\lambda^2} \tag{3.7}$$

$$\Pi_4 = \frac{t\rho c_p^2\Delta T}{\lambda} \tag{3.8}$$

$$\Pi_5 = \frac{P\rho c_p^{1.5}}{\lambda^2\sqrt{\Delta T}} \tag{3.9}$$

La combinaison de ces groupes adimensionnels conduit à la définition de nombres adimensionnels classiques tels que le nombre capillaire Ca, le nombre de Bond Bo, le nombre de Weber We... qui permettent de discuter l'influence relative des différents phénomènes impliqués dans l'étalement de la macro-goutte de métal liquide. Ces groupes permettent aussi de définir des paramètres adimensionnels plus significatifs pour la description du mécanisme d'étalement :

— le paramètre d'étalement noté $\frac{R}{r}$:

$$\frac{\Pi_1}{\Pi_2} = \frac{R(t)}{r} = \frac{R}{r} \tag{3.10}$$

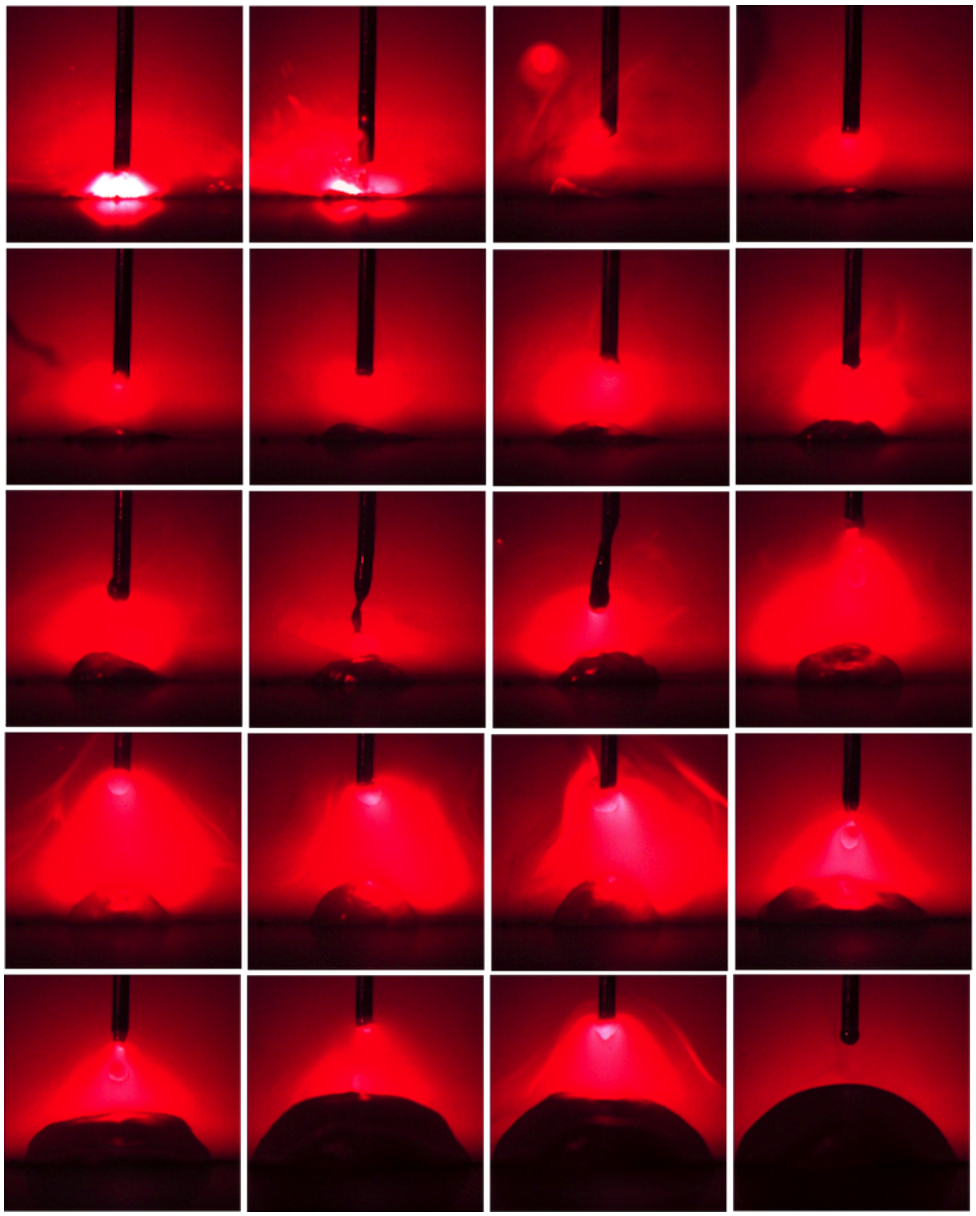


FIGURE 3.5 – Extraits d'un enregistrement en vidéo rapide au cours d'une opération de soudage MAG pulsé en configuration statique (chronologie : de gauche à droite et de haut en bas) [**?**]. La première image correspond à l'initiation de l'arc. Les suivantes permettent d'observer les différentes phases de régime d'arc ainsi que les apports d'énergie et de matière permettant la formation et la croissance de la macro-goutte. La dernière image correspond à l'extinction de l'arc.

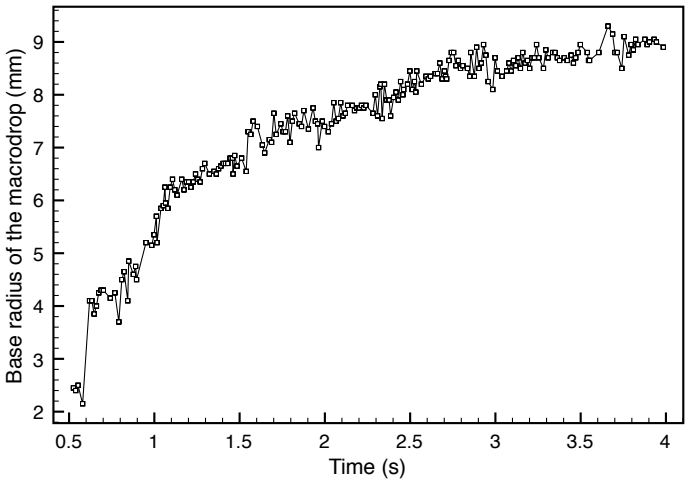


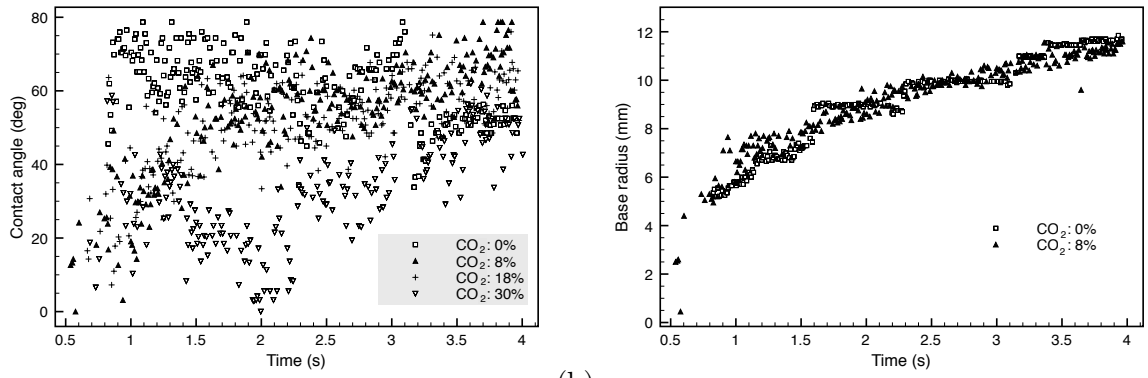
FIGURE 3.6 – Evolution de la base de la macro-goutte (rayon de base R) lors du dépôt de métal liquide en GMAW [**?**].

— et le volume adimensionné V^* qui correspond au ratio entre le volume de métal liquide déposé et le volume d'une gouttelette de métal liquide :

$$V^* = \frac{3}{4\pi}\frac{\Pi_3\Pi_4}{\Pi_2^3} \tag{3.11}$$

Le groupe adimensionnel Π_5 peut être perçu comme un nombre adimensionnel qui représente les effets énergétiques (liés à la puissance de soudage et/ou à la température initiale du substrat solide) : il décrit l'apport d'énergie au système induit par l'opération de soudage, que ce soit par apport direct ou par effet de pré-chauffage.

Les expériences de dépôt ont permis d'observer la formation et la croissance de la macro-goutte et de suivre l'évolution de son rayon de base au cours du dépôt (figure 3.6). Ces mesures permettent également d'obtenir la cinétique de déplacement de la ligne triple. Cette cinétique, qui suit une évolution de type racine carrée du temps, correspond au comportement classique d'étalement en régime inertiel d'une goutte au cours d'un dépôt [**?**]. Après l'établissement de l'arc, la phase initiale de croissance rapide de la macro-goutte correspond à une phase d'éclairage direct de l'arc sur la cible solide. Cet apport direct de chaleur provoque une fusion des couches superficielles de la cible métallique qui, combinée aux forces inertielles qui agissent sur les gouttelettes lors de l'impact, facilite l'étalement de la macro-goutte. Après cette phase d'étalement rapide, la macro-goutte continue de croître régulièrement grâce à l'apport de matière fourni par les gouttelettes. La vitesse d'étalement est plus faible sous l'action des forces de viscosité et de tension de surface (vitesse moyenne de la ligne triple u=1,23 mm), la croissance s'effectuant aussi en volume. Le nombre capillaire $Ca = \frac{\mu u}{\gamma}$ est inférieur à 2×10^{-5}, témoignant de la contribution moindre des effets de viscosité par rapport aux effets de tension de surface. L'étalement de la macro-goutte s'effectue sous l'action équilibrée des forces de gravité et de tension de surface comme le montre le nombre de Bond $Bo = \frac{\Delta\rho g R^2}{\gamma}$ inférieur à 2,5 quelle que soit la phase du dépôt. La résistance à l'étalement peut être évaluée avec le nombre d'Ohnesorge qui correspond au rapport des forces de viscosité avec la tension superficielle et les forces d'inertie : $Z = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\gamma R}}$. Au cours des essais, le nombre d'Ohnesorge varie entre 10^{-3} et 10^{-2} ; même si les forces de viscosité sont mobilisées dans le développement de la macro-goutte, leur effet est limité comparativement à celui des forces inertielles et de tension superficielle. Le nombre de Weber $We = \frac{\rho R u^2}{\gamma}$ permet d'appréhender l'importance relative des forces inertielles et de tension superficielle. Les faibles



(a) (b)

FIGURE 3.7 – Évolution de la macro-goutte pour différentes compositions chimiques du gaz de soudage (mélange binaire Argon - CO_2, exprimé en pourcentage de CO_2). (a) Évolution de l'angle de mouillage θ. Le graphe décrit le mouillage obtenu pour les différentes compositions chimiques ; la diminution de l'angle de mouillage correspond à une amélioration du mouillage. (b) Évolution du rayon de base de la macro-goutte au cours du dépôt de métal liquide pour deux compositions chimiques du gaz de soudage : mélange binaire Argon (92%) - CO_2 (8%) et Argon pur (0% CO_2). Les paliers clairement visibles dans le cas de l'Argon pur correspondent à des phases pendant lesquelles la ligne triple est immobile. L'étalement de la macro-goutte s'effectue alors avec une succession de "blocages" et "déblocages" de la ligne triple. L'effet tensioactif lié à la présence de CO_2 se traduit par une croissance plus régulière de la base de la macro-goutte.

valeurs obtenues tout au long de la formation et de l'étalement de la macro-goutte, entre 10^{-3} et 10^{-2}, témoignent de l'importance des effets capillaires.

La croissance, l'étalement et la forme de la macro-goutte de métal en fusion sont directement liés aux effets de capillarité. La sensibilité aux paramètres procédés de la tension superficielle et de l'angle de mouillage au niveau de la ligne triple a des conséquences directes sur le comportement des interfaces liquides. Ce type de comportement a pu être mis en évidence au niveau du mouillage de la macro-goutte par l'ajout d'éléments tensioactifs dans le gaz de soudage. Le passage d'un gaz inerte, Argon pur, à un mélange binaire de type Argon - CO_2 contribue à modifier le mouillage de la macro-goutte. En effet, la quantité de tensioactifs mobilisés, à travers la quantité de CO_2 intervenant dans la composition chimique du gaz, modifie la tension superficielle et améliore le mouillage. Cet effet est observable sur la figure 3.7(a) pour laquelle on peut remarquer une diminution de la valeur moyenne des angles de mouillage mesurés au cours du dépôt lorsque la teneur en CO_2 augmente. La cinétique de la ligne triple est également plus régulière en présence de tensioactif comme le montre la figure 3.7(b), ce qui traduit un meilleur comportement au mouillage.

Au cours du soudage, le comportement des zones de métal liquide est directement lié à l'apport de matière mais aussi d'énergie. A titre d'exemple, l'augmentation de la vitesse fil (vitesse de dévidage de l'électrode fusible) permet un taux de dépôt de matière plus important mais aussi un apport énergétique plus important lié à l'augmentation de la quantité de matière liquide à fournir. L'augmentation de ce paramètre procédé se traduit par un étalement de la macro-goutte plus important et un meilleur mouillage. La modification de la température initiale T_0 de la cible métallique est une autre possibilité de modifier la quantité d'énergie amenée au système. Pour des paramètres procédés identiques, l'augmentation de la température T_0 se traduit par une diminution des valeurs de l'angle de mouillage, améliorant ainsi le mouillage. L'analyse dimensionnelle a permis de définir un paramètre adimensionnel $\Pi_5 = \frac{P\rho c_p^{1,5}}{\lambda^2\sqrt{\Delta T}}$ qui permet de tenir compte des différents apports d'énergie et phénomènes thermiques impliqués dans l'opération de soudage. Dans cette configuration non isotherme avec apport régulier de matière, le régime transitoire qui décrit l'étalement de la macro-goutte peut être décrit par une

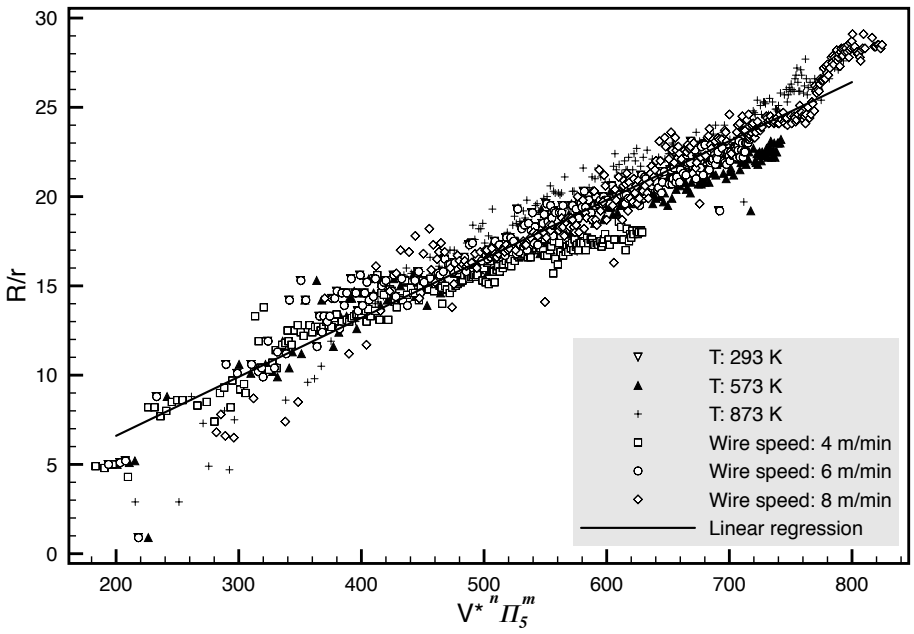


FIGURE 3.8 – Évolution du paramètre d'étalement de la macro-goutte $R(t)/r$ en fonction des paramètres liés aux transferts de matière et d'énergie. L'ensemble des données expérimentales peut être ramené sur une même courbe de tendance qui traduit la relation de proportionnalité 3.12.

unique relation empirique qui tient compte des transferts de masse et d'énergie :

$$\frac{R(t)}{r} \propto V^{*n}\Pi_5^m \tag{3.12}$$

La figure 3.8 illustre l'utilité de cette relation qui permet de regrouper l'ensemble des données expérimentales obtenues autour d'une même droite de tendance, traduisant l'importance de l'apport de matière et d'énergie, quelle que soit la façon dont l'énergie est fournie au système. L'amélioration du mouillage avec l'augmentation de la quantité d'énergie fournie, observée au niveau de la ligne triple, est également clairement visible sur la figure 3.9.

Au-delà de l'importance des effets capillaires dans le comportement des zones liquides, ces études montrent la sensibilité aux variations de composition chimique au niveau des interfaces et le rôle des effets thermiques au niveau du comportement de la ligne triple et donc du dépôt de matière.

3.3 Frontière liquide/solide

PRINCIPALES COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS : [**?**, **?**]

La caractérisation de la ligne triple, qui définit la frontière solide/liquide à la surface du bain de fusion, reste une question ouverte. S'il est possible d'évaluer la cinétique de croissance d'un bain de fusion ou d'étalement d'une goutte liquide à l'échelle "macroscopique", de nombreux phénomènes se développent à l'échelle "microscopique" au niveau de la ligne triple. En soudage, cette zone correspond en effet à la zone de formation de la microstructure.

Selon l'échelle d'étude, l'identification expérimentale de la position de la ligne triple n'est pas simple ; l'interface solide/liquide peut parfois être difficile à appréhender à cause de la coexistence

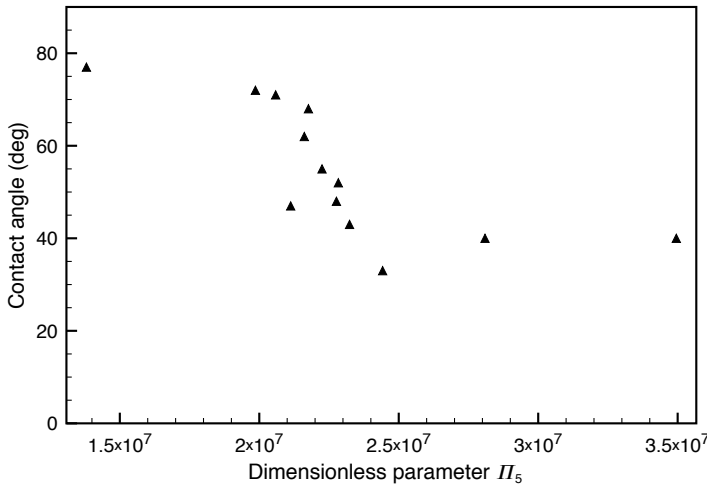


FIGURE 3.9 – Angle de mouillage vs paramètre énergétique adimensionnel Π_5.

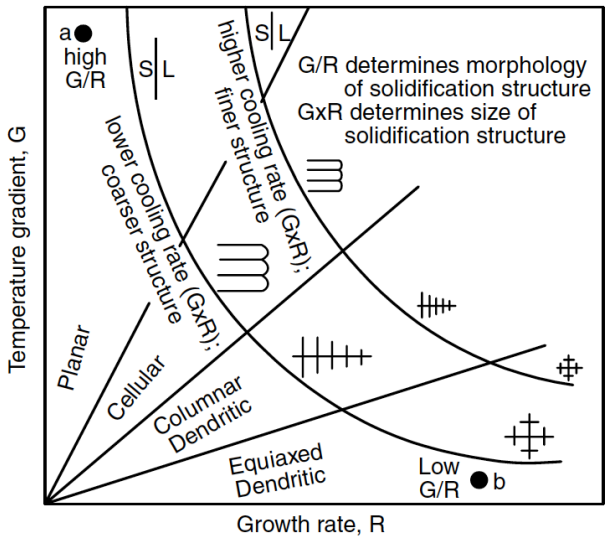


FIGURE 3.10 – Effet du gradient de température G et de la vitesse de solidification R sur la morphologie et la taille des microstructures obtenues au cours de la solidification [**?**].

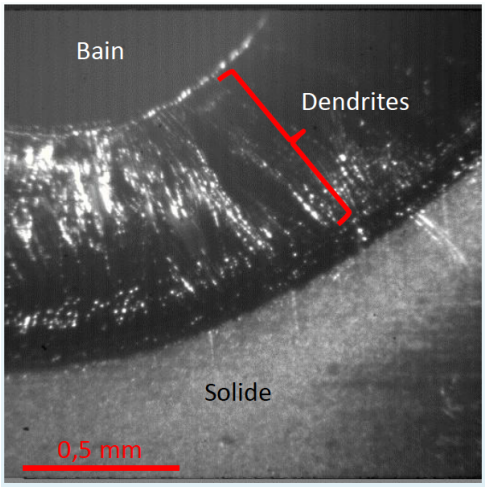


FIGURE 3.11 – Formation de dendrites au cours de la solidification du bain de fusion, soudage TIG, acier 304L. Croissance épitaxiale. Thèse d'Alexis Chiocca.

d'une phase liquide et d'une phase solide fortement imbriquées. Cette zone de coexistence a été mise en évidence expérimentalement dans les travaux de thèse d'Alexis Chiocca qui portent sur l'étude de la solidification en soudage TIG. L'analyse de la phase de solidification est importante car elle impacte les propriétés mécaniques des joints soudés fortement liées à la microstructure obtenue, elle-même conséquence directe de l'opération de soudage comme le montre la figure 2.2. La solidification est un problème complexe, sensible aux concentrations en solutés, aux effets liés à la surfusion, aux vitesses relatives d'écoulements liquides [**?**] et à l'échelle macroscopique, aux gradients de température et à la vitesse de solidification qui conditionnent la morphologie et la taille des microstructures obtenues (figure 3.10). En soudage, le processus de solidification fait souvent apparaître des structures dendritiques de types colonnaires ou équiaxes.

Dans le cadre de la thèse d'Alexis Chiocca, un protocole expérimental spécifique a été développé pour étudier les cinétiques des fronts de solidification et de la croissance épitaxiale au cours de la solidification. L'expérience est basée sur une opération de fusion par soudage TIG statique. La solidification du bain de fusion est observée, en face envers du bain de fusion, en vidéo rapide avec un dispositif de microscopie et d'éclairage par diode laser, au cours de la phase d'extinction de l'arc. La zone d'observation est par conséquent réduite à une zone de 1,5 mm x 1,5 mm pour une faible profondeur de champ (inférieure à 1 mm), mais ce dispositif permet à la fois d'observer la décroissance du bain de fusion et la croissance des dendrites au cours de la solidification (figure 3.11). Cette démarche expérimentale permet en outre, après traitement, d'accéder à des informations quantitatives telles que l'espacement des bras primaires de dendrites, de l'ordre de 10 à 20 μm, ou la vitesse du front de solidification de l'ordre de 3 mm/s.

Les mouvements liquides, contrôlés en grande partie par la convection de type Marangoni, sont étudiés en surface du bain de fusion "envers" sur un alliage binaire Cu30Ni par une méthode de Particle Tracking Velocimetry (figure 3.12). Cette méthode de PTV s'appuie sur les marqueurs naturels du bain de fusion, les oxydes, qui jouent le rôle de particules. La circulation fluide est centripète comme le montrent les mouvements des particules qui circulent entre les bras primaires des dendrites en cours de formation pour entrer dans le bain liquide à proprement parler et se diriger vers son centre. Ces mouvements liquides surfaciques sont de type laminaire (nombre de Reynolds $Re < 2000$) avec une diminution de la vitesse observée entre la périphérie (zone de solidification) et le centre du bain de fusion. Les vitesses d'écoulement augmentent globalement avec l'augmentation de l'énergie de soudage. Grâce à ces études expérimentales, Alexis Chiocca a pu montrer dans ses travaux de thèse l'importance des mouvements liquides et des effets de convection dans le processus de solidification. En ce qui concerne le transport de matière, à l'échelle locale de la dendrite, le nombre de Péclet Pe lié au transport de soluté prend des valeurs comprises entre 5 et 100, soulignant l'importance de la convection en terme de dispersion de masse par rapport à un modèle purement diffusif. En ce qui concerne les transferts thermiques, le nombre de Péclet thermique Pe_θ est très faible à l'échelle locale ($Pe_\theta << 1$) : au niveau des dendrites, le phénomène de conduction semble ainsi piloter les transferts thermiques. Par contre, à l'échelle macroscopique du bain liquide, le nombre de Péclet thermique est relativement grand ($Pe_\theta \approx 50$). La convection thermique influence ainsi significativement la forme et la taille du bain de fusion, comme souligné dans l'étude de la thermocapillarité.

La compréhension du comportement in-situ de la ligne triple, dans ces conditions de forts gradients thermiques, de changements de phase et de formation de la microstructure, reste une problématique de recherche importante et constitue un défi majeur en terme d'expérimentation.

3.4 Conclusion

Les interfaces liquide-gaz, tels que ceux évoqués dans ce chapitre, occupent une place importante en soudage à l'arc et les phénomènes qui s'y développent conditionnent le déroulement des différentes phases de l'opération de soudage : création du bain de fusion, comportement et stabilité du bain de fusion, solidification, quelles que soient les configurations de soudage. Les

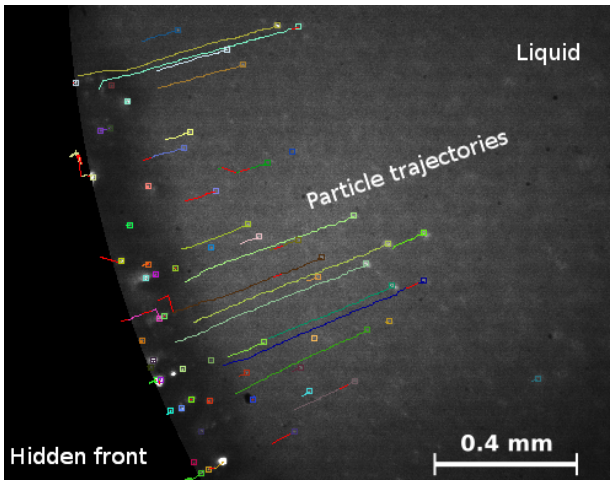


FIGURE 3.12 – Visualisation des mouvements liquides dans un bain de fusion par PTV (Particle Tracking Velocimetry) en face envers, sur un alliage binaire Cu30Ni. Thèse d'Alexis Chiocca.

interfaces sont sièges de transferts de chaleur et de masse, et les phénomènes qui s'y développent conditionnent la forme globale du bain de fusion et la qualité finale du cordon de soudure. Les études expérimentales réalisées ont permis de montrer le rôle des effets capillaires et du mouillage (à travers notamment la tension de surface γ et l'angle de mouillage θ) dans le comportement des différentes zones de métal liquide à hautes températures. Ces études ont aussi souligné le rôle des tensioactifs de diverses natures et des effets énergétiques liés aux procédés dans l'évolution de ces grandeurs et leurs effets sur les phases liquides.

Chapitre 4

Poursuivre...

Ce dernier chapitre présente des axes de recherche futurs, qui s'inscrivent dans la complémentarité des travaux présentés dans les chapitres précédents. Pour certains, des actions de recherche sont déjà lancées, mais leurs potentialités et leurs complexités en font des axes de recherche à moyen voire long terme. Les thématiques s'organisent principalement autour de problématiques physiques (section 4.1), nécessitant le développement d'outils et de protocoles d'investigations (section 4.2), l'ensemble permettant d'envisager des transferts à travers des applications de type R&D à finalités industrielles (section 4.3).

4.1 Problématiques physiques

Détachement des gouttes et stabilité des phases liquides

La rupture des ponts liquides est un phénomène complexe, que ce soit dans le cas de ponts liquides entres grains solides ou dans le cas de métal d'apport. Même dans le cas de l'eau, en conditions isothermes, plusieurs mécanismes peuvent conduire à la rupture du pont liquide [**?**].

Au niveau du métal d'apport, la rupture du pont liquide à l'extrémité du fil fusible, au moment du détachement de la gouttelette, peut conduire à la formation d'une ou plusieurs gouttelette(s) satellite(s). Ce type de phénomène peut aussi être observé lors de la rupture de pont liquide soumis à une sollicitation de traction, comme dans le cas d'un doublet de grains reliés par de l'eau. Dans le cas du transfert en pulvérisation axiale (mode "spray"), avant le détachement effectif des gouttelettes, une veine de métal liquide, plus ou moins longue et plus ou moins stable, peut se former entre la gouttelette et le fil d'apport. Ce phénomène, qui peut s'apparenter à une instabilité de Rayleigh-Plateau, conduit à la formation d'un chapelet de gouttes, traduisant une minimisation de l'énergie de surface au niveau de l'interface liquide-gaz. Une meilleure compréhension des mécanismes d'apparition de cette instabilité et de rupture des ponts liquides peut être intéressante pour comprendre la formation de ces gouttelettes satellites qui peuvent être de tailles variables. Ces gouttelettes, aux trajectoires parfois assez erratiques, contribuent aux projections métalliques qui apparaissent en soudage, nécessitant parfois d'assez longues opérations de parachèvement.

Au niveau de la surface du bain de fusion, l'impact des gouttelettes de métal liquide, et le comportement à l'absorption qui en résulte, génèrent des ondes de surfaces qui peuvent s'apparenter à des ondes de type capillaires. Ces ondes capillaires modifient le comportement dynamique de la surface libre et de la ligne triple. Dans certains procédés de soudage particuliers, le bain de fusion peut aussi être sollicité par les phases cycliques de plongées et de retraits du fil fusible. Ces sollicitations se traduisent par des perturbations de la surface du bain qui peut prendre un comportement oscillatoire.

L'étude de la stabilité des phases liquides au sens large constitue un enjeu majeur en soudage à l'arc car les problèmes de stabilité observés au niveau du bain de fusion, étroitement liés aux

problématiques de mouillage, peuvent conduire à l'apparition de défauts importants comme dans le cas du "humping" ou de l' "undercutting" évoqués au paragraphe 1.3.2.

Caractéristiques et propriétés physiques in-situ

La détermination des propriétés physiques des métaux à hautes températures, en phase liquide, constitue un enjeu de recherche important. Le développement des approches expérimentales permettant de caractériser le comportement des phases liquides en cours de soudage à l'arc peut apporter des éléments intéressants. En effet, la détermination de grandeurs physiques, telles que la tension de surface et la viscosité, couplée à des mesures de températures de surface des zones liquides, doit permettre d'enrichir la description du comportement des phases liquides. Les données obtenues in-situ intègrent à la fois les effets inhérents aux matériaux mis en oeuvre (compositions chimiques), les effets liés à l'interaction liquide-gaz/plasma, et les effets liés aux procédés (paramètres énergétiques, vitesses et flux).

4.2 Outils et protocoles d'investigation

L'étude des deux thématiques citées précédemment nécessite la mise en place d'investigations expérimentales permettant de caractériser en cours de soudage les températures des zones liquides et les mécanismes de transferts. Certains aspects sont en cours de développement.

Températures des zones liquides

La thermique est au coeur du procédé de soudage à l'arc et les effets des hautes températures atteintes et des forts gradients thermiques créés sont nombreux. L'accès à l'information thermique d'un point de vue expérimental est donc crucial pour la compréhension physique, pour la validation des résultats de simulations numériques, pour la détermination des contraintes résiduelles ou encore le contrôle des procédés.

La mesure de température dans les zones solides est relativement aisée, moyennant quelques précautions vis-à-vis de l'arc : mesures ponctuelles par thermocouples ou par pyromètres, ou encore mesures de champs de température avec des procédés optiques (caméras thermiques, IR ou autres procédés).

La détermination des températures au niveau des zones liquides est par contre beaucoup plus difficile : surfaces mobiles, présence de l'arc qui les recouvre, températures supérieures au liquidus, sont autant de difficultés qui rendent les mesures très délicates à réaliser. Dans ces conditions, la mesure des températures nécessite la mise en oeuvre de techniques de mesure sans contact. La littérature propose plusieurs techniques expérimentales pour réaliser ce type de mesures : caméras infrarouges, pyrométrie bichromatique, pyrométrie polychromatique, spectrale ou encore pyroréflectométrie [**?**, **?**, **?**, **?**]. La plupart de ces méthodes de mesures sont cependant soumises à une sensibilité importante à l'émissivité, cette dernière étant difficilement quantifiable dans le cas de surfaces mobiles de métal liquide à hautes températures. Seules la pyrométrie spectrale et la pyroréflectométrie permettent de s'affranchir complètement de cette indétermination, mais cette dernière méthode n'est pas adaptée aux phases liquides, qui plus est en cours de soudage. Dans le cadre de la thèse de Romain Monier [1], qui concerne l'étude du comportement des phases liquides en soudage, une méthode de mesure de température basée sur la pyrométrie bichromatique est mise en place. Ce choix se justifie par la possibilité d'effectuer des mesures de champ et de permettre une potentielle utilisation ultérieure en tant que système de contrôle en application industrielle. La figure 4.1 montre un exemple d'acquisition en pyrométrie bichromatique appliquée à l'étude d'une gouttelette de métal liquide en cours de

1. Le recrutement en thèse de Romain Monier, ingénieur Mécanique MSI de Polytech Montpellier, fait suite à une prestation de recherche pour Areva NP qui a conduit à l'obtention d'un financement de thèse Cifre à partir de janvier 2014.

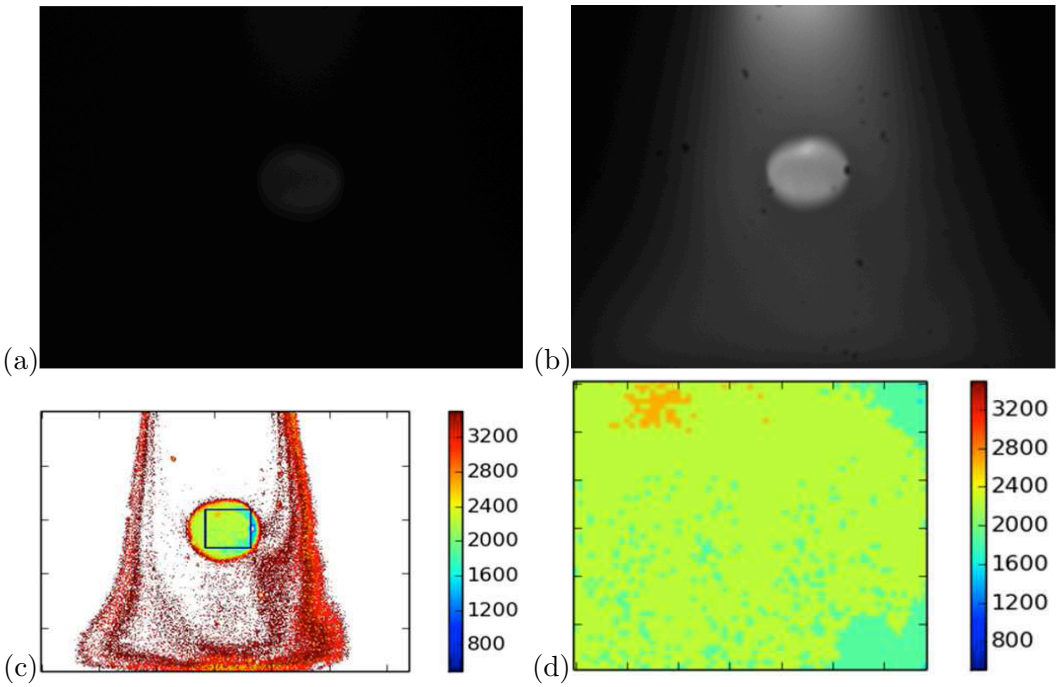


FIGURE 4.1 – Mesure de température par pyrométrie bichromatique dans le cas du transfert d'une gouttelette de métal liquide en soudage MAG pulsé, avec gaz de protection binaire Argon (92%) - CO_2 (8%) : (a) image à longueur d'onde 850 nm, (b) image à longueur d'onde 1000 nm, (c) champ de température obtenu pour l'ensemble de la scène après traitement numérique, (d) détail du champ de température au niveau de la surface de la gouttelette. Thèse de Romain Monier.

transfert en soudage MAG. La même scène est enregistrée de façon synchrone via deux chemins optiques identiques munis de filtres interférentiels de longueurs d'onde différentes λ_1 et λ_2 grâce à deux caméras identiques proche infrarouges (figure 4.1 (a) et (b)), ce qui permet d'obtenir des champs de température en surface des zones liquides, comme dans le cas des gouttelettes en transfert (figure 4.1 (c) et (d)).

Cette approche expérimentale apparaît comme prometteuse dans le cas du soudage à l'arc pour réaliser des mesures de température sans contact, dans des zones particulièrement difficiles à instrumenter. Ce type de dispositif de mesure, complémentaire des moyens déjà intégrés dans notre plateforme expérimentale, apporte une extension intéressante des champs d'investigations et des possibilités d'études. Par exemple, dans le cas de la solidification, la mise en place d'une étude intégrant des mesures synchronisées de la cinétique du front de solidification, de la croissance dendritique, des mouvements liquides et des champs de température dans le liquide et le solide, permettrait d'analyser le processus de solidification en situation réelle en prenant en compte l'ensemble des mécanismes essentiels.

Transferts

PRINCIPALES COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS : [**?**]

En soudage MIG/MAG, la fusion du fil et le mode de transfert du métal dans l'arc sont essentiellement liés à l'énergie de soudage et à la composition du gaz de protection. Les principaux modes de transferts sont en relation directe avec le niveau d'énergie, avec dans l'ordre croissant d'énergie de soudage : le court-circuit, le mode pulsé, le mode globulaire, la pulvérisation axiale et la veine liquide tournante.

Parmi ces différents modes de transferts métalliques, le mode pulsé est particulièrement

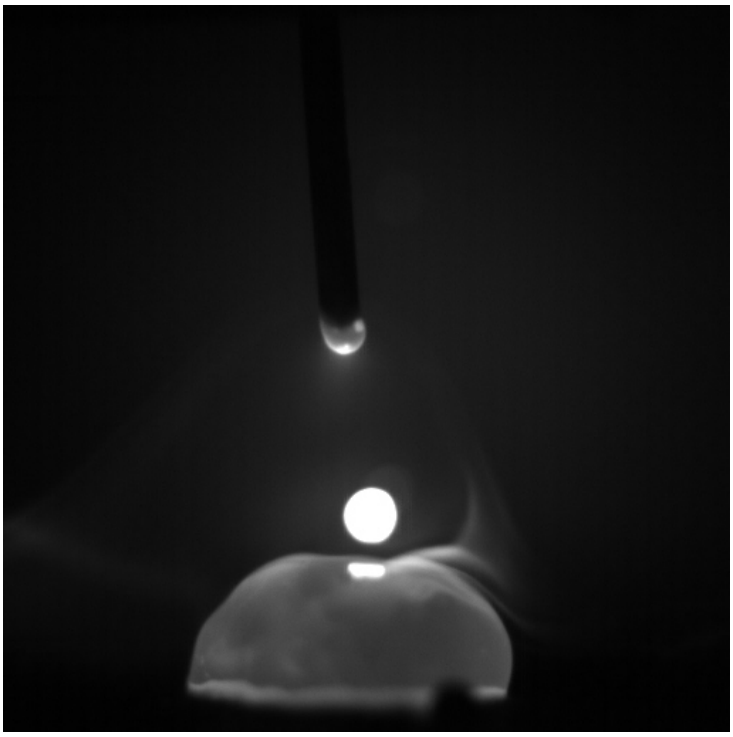


FIGURE 4.2 – Soudage en mode pulsé. Une gouttelette en phase de vol libre avant impact et absorption dans le bain liquide. Une autre gouttelette est en cours de formation à l'extrémité du fil fusible. Image extraite d'une séquence vidéo avec un filtre interférentiel à 1000 nm.

intéressant car il se rapproche de situations plus "classiques" de dépôts de gouttelettes liquides et autorise certaines analogies d'étude dans le comportement des gouttelettes. Le transfert pulsé se décompose en différentes phases : fusion de l'extrémité du fil solide qui entraîne la formation et la croissance de la gouttelette liquide, striction de la veine liquide, chute de la gouttelette, impact et absorption dans le bain liquide (figure 4.2). Lorsque les réglages des paramètres procédés sont correctement effectués, une gouttelette est transférée à chaque période du cycle énergétique, la gouttelette ayant une taille caractéristique voisine du diamètre du fil fusible. Le comportement de la gouttelette à l'extrémité du fil fusible résulte d'actions multiples d'origine volumiques ou surfaciques : effet de la gravité, forces électromagnétiques, effets de tension de surface, de viscosité et frottement (force de traînée) avec le flux gazeux environnant. Le détachement de la gouttelette résulte principalement de l'effet combiné de deux mécanismes [**?**] :

— l'action de la pression capillaire obtenue par l'équation de Laplace (1.1) écrite au niveau de la zone de striction, les rayons R_1 et R_2 correspondant aux rayons principaux de courbure intérieur et extérieur (rayons de gorge) :

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{4.1}$$

— l'action de la pression électromagnétique qui se développe dans la section de gorge sous l'effet des forces électromagnétiques qui parcourent le métal. Cette pression, directement proportionnelle au carré de l'intensité de courant électrique, atteint son maximum au temps "chaud" du cycle énergétique qui correspond au "pinch effect" entraînant le détachement de la goutte.

L'étude du comportement des gouttelettes au cours de leur transfert durant le soudage en mode pulsé peut permettre d'accéder à des informations in-situ telles que la tension superficielle et la viscosité. Les fondements théoriques reposent sur les travaux de Lord Rayleigh [**?**] pour la tension superficielle et de H. Lamb [**?**] pour la viscosité. L'analyse des oscillations des goutte-

lettes durant leur vol libre permet de relier le mode d'oscillations et leur fréquence à la tension superficielle, tandis que l'amortissement observé permet d'estimer la viscosité. Cette approche a été utilisée avec succès dans des configurations basées sur des liquides tels que l'eau ou le glycol [**?**, **?**]. Des approches similaires, avec des modèles plus simples, ont été utilisées pour l'étude de gouttelettes de métal liquide en lévitation [**?**] ou en soudage [**?**, **?**, **?**]. Des expériences de ce type ont été réalisées au sein de notre équipe de recherche en s'appuyant sur les outils et le savoir-faire expérimental développés au sein de notre équipe. Les essais réalisés en mode pulsé permettent d'estimer la tension de surface γ à 1,2 N/m dans le cas d'un gaz de protection composé d'Argon à 100% et à 0,9 N/m dans le cas d'un mélange binaire 92% Argon et 8% CO_2 [**?**]. L'effet tensioactif lié à la composition chimique du gaz de protection, effet qui a déjà été mis en évidence par l'étude du mouillage (étude en configuration "macro-goutte", section 3.2), peut ainsi être directement estimé au niveau de la détermination de la tension de surface. Ce type d'approche fait l'objet d'une partie des travaux de thèse de Romain Monier. Des développements dans l'analyse des oscillations peuvent être effectués en prenant en compte notamment les effets de rotation des gouttelettes sur elles-mêmes et les oscillations hors axes principaux du référentiel de l'installation. La caractérisation in-situ des effets de la composition chimique du gaz et des paramètres procédés sur les phases de transferts métalliques et sur les propriétés physiques (tension de surface et viscosité) du métal liquide peut ainsi être envisagée de façon plus systématique à moyen terme.

4.3 Fabrication additive par procédés arc

Le développement important observé ces dernières années dans le domaine de la fabrication additive peut constituer une application intéressante des procédés arc (qu'ils soient de type TIG ou de type MIG-MAG) pour la fabrication des pièces métalliques. Les compétences acquises dans les domaines des transferts de matière et d'énergie, ainsi que dans le comportement des dépôts métalliques en phase liquide, peuvent contribuer à optimiser les stratégies de dépôt pour l'obtention des produits semi-finis : influence de la gravité sur les transferts métalliques, orientation relative pièce/torche, choix des épaisseurs des différentes couches... De même, les moyens et techniques de mesure développés dans le cadre des travaux présentés précédemment peuvent trouver des applications plus ou moins directes en tant que moyens de contrôle du procédé. Au-delà de l'intérêt technique de cette application, l'objectif est de pouvoir proposer à terme des systèmes économiques de fabrication additive métallique permettant la réalisation de pièces à porosité faible ou nulle. Le développement de tels systèmes repose sur l'utilisation de procédés arc robotisés qui nécessitent l'étude et la mise en place de la chaîne de commande : modèle numérique, définition des trajectoires, contrôle/commande du robot et du poste pour la gestion des trajectoires et des transferts d'énergie et de matière, mise en place des moyens de contrôle et boucle retour pour correction dynamique... Cette problématique constitue le coeur des travaux de thèse de Simon Radel qui démarre en octobre 2015 en co-tutelle avec Olivier Company et Sébastien Krut du LIRMM [2].

4.4 Conclusion

Les axes de recherche évoqués ici ne constituent bien entendu pas une liste exhaustive de l'ensemble des possibilités mais présentent des problématiques qui me paraissent intéressantes à court et moyen terme. Les applications industrielles possibles de ces différentes problématiques de recherche sont multiples :

— optimisation des procédés de soudage à l'arc : au niveau des modes opératoires et des choix de paramètres au sens large (compositions chimiques, intensité, tension, vitesses,

2. Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier

débits...),
- constance de la qualité des cordons de soudure dans un contexte de productivité : en définissant et analysant les limites de stabilité des procédés,
- contrôle des procédés : contribution au développement d'outils de diagnostic et de contrôle en cours de soudage,
- maîtrise des dépôts de matière : la gestion du taux de matière déposée passe par la maîtrise de la qualité du mouillage en lien avec les paramètres procédés pour les différentes situations rencontrées (trajectoires, dépouilles, état de surface...).

Conclusion

La démarche et les travaux présentés dans ce mémoire sont bien entendu incomplets mais permettent d'apporter quelques éléments de discussion. Ils ouvrent des champs d'investigations assez larges, et les pistes d'études, aussi bien dans le domaine fondamental que pour les applications à finalités industrielles, sont nombreuses. Les champs d'application concernent en effet les assemblages aux sens large, le soudage bien entendu, mais aussi les procédés de frittage ou de fabrication additive qui peuvent se trouver à l'interface des problématiques de soudage et de matériaux granulaires.

L'exercice de projection dans le futur n'est pas un exercice facile et certains choix d'étude se feront au gré des rencontres et pourraient parfois se faire en fonction d'opportunités plus ou moins circonstanciées (figure 5.1).

Au cours de ces dernières années, j'ai eu l'opportunité de travailler sur des problématiques liées aux interfaces et aux phénomènes capillaires dans des contextes aussi différents que les milieux granulaires non saturés ou les opérations de soudage à l'arc. Ce parcours, qui s'est construit au fil du temps, a été riche de rencontres, d'échanges et de collaborations avec des collègues issus de communautés scientifiques tout aussi variées. Il me semble que c'est le point important : la richesse du monde de la recherche réside avant tout dans l'échange, et j'espère transmettre à nos étudiants, et jeunes collègues, l'enthousiasme et le plaisir de travailler ensemble que j'ai pu rencontrer au cours de ces différentes activités.

FIGURE 5.1 – En espérant que ce qui est décrit dans ce strip ne devienne pas une réalité future... Illustration de Xavier Gorce, série *"Les Indégivrables"*.

Bibliographie

[1] M. Reyssat, D. Richard, C. Clanet, and D. Quéré. Dynamical superhydrophobicity. *Faraday Discussions*, 146(19) :19–33, 2010.

[2] K. C. Mills, B. J. Keene, R. F. Brooks, and A. Shirali. Marangoni effects in welding. *Philosophical transactions of the Royal Society A*, 356(1739) :911–925, 1998.

[3] K.C. Mills, E.D. Hondros, and Z. Li. Interfacial phenomena in high temperature processes. *Journal of Materials Science*, 40 :2403–2409, 2005.

[4] P.G. de Gennes. Wetting : statics and dynamics. *Reviews of Modern Physics*, 57(3) :827–863, 1985.

[5] D. Bonn, J. Eggers, J. Indekeu, J. Meunier, and E. Rolley. Wetting and spreading. *Review of Modern Physics*, 81 :739–805, 2009.

[6] D. Quéré. Rough ideas on wetting. *Physica A*, 313 :32–46, 2002.

[7] F. Soulié, M.S. El Youssoufi, F. Cherblanc, and C. Saix. Capillary cohesion and mechanical strength of polydisperse granular materials. *European Physical Journal E*, 21 :349–357, 2006.

[8] F. Soulié, M.S. El Youssoufi, F. Cherblanc, and C. Saix. Influence of liquid bridges on the mechanical behaviour of polydisperse granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30 :213–228, 2006.

[9] F. Soulié, M.S. El Youssoufi, J.-Y. Delenne, C. Voivret, and C. Saix. Effect of the crystallization of a solute on the cohesion in granular materials,. *Powder Technology*, 175 :43–47, 2007.

[10] J.-Y. Delenne, F. Soulié, M.S. El Youssoufi, and C. Saix. Evolution of cohesion in a granular material : from capillarity to cementation. *Comptes Rendus Mécanique*, 335(2) :119–124, 2007.

[11] J.-Y. Delenne, F. Soulié, M.S. El Youssoufi, and F. Radjai. Compressive strength of an unsaturated granular material during cementation. *Powder Technology*, 208(2) :308–311, 2011.

[12] J.-Y. Delenne, F. Soulié, M.S. El Youssoufi, and F. Radjai. From liquid to solid bonding in cohesive granular media. *Mechanics of Materials*, 43(10) :529–537, 2011.

[13] T.C. Halsey and A.J. Levine. How sandcastles fall. *Physical Review Letters*, 80(14) :3141–3144, 1998.

[14] S.M. Iveson, J.D. Litster, K. Hapgood, and B.J. Ennis. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes : a review. *Powder Technology*, 117 :3–39, 2001.

[15] F. Soulié. *Cohésion par capillarité et comportement mécanique de milieux granulaires*. PhD thesis, Université Montpellier 2, 2005.

[16] V. Richefeu, M.S. El Youssoufi, R. Peyroux, and F. Radjai. A model of capillary cohesion for numerical simulations of 3d polydisperse granular media. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(11) :1365–1383, 2007.

[17] J.P. Gras, J.-Y. Delenne, F. Soulié, and M.S. El Youssoufi. Dem and experimental analysis of the water retention curve in polydisperse granular media. *Powder Technology*, 208(2) :296–300, 2011.

[18] J.-P. Gras, J.-Y. Delenne, and M. S. El Youssoufi. Study of capillary interaction between two grains : a new experimental device with suction control. *Granular Matter*, 15 :49–56, 2013.

[19] L. Scholtès, P.-Y. Hicher, F. Nicot, B. Chareyre, and F. Darve. On the capillary stress tensor in wet granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33 :1289–1313, 2009.

[20] B. Mielniczuk, T. Hueckel, and M.S. El Youssoufi. Evaporation-induced evolution of the capillary force between two grains. *Granular Matter*, 2014.

[21] B. Mielniczuk, T. Hueckel, and M.S. El Youssoufi. Laplace pressure evolution and four instabilities in evaporating two-grain liquid bridges. *Powder Technology*, 283 :137–151, 2015.

[22] G. Gagneux and O. Millet. Analytic calculation of capillary bridge properties deduced as an inverse problem from experimental data. *Transport in Porous Media*, 105 :117–139, 2014.

[23] S. Kou. *Welding Metallurgy.* John Wiley & Sons, 2nd edition edition, 2003.

[24] T.C. Nguyen, D.C. Weckman, D.A. Johnson, and H.W. Kerr. High speed fusion weld bead defects. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(6) :618–633, 2006.

[25] J. Chapuis. *Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc.* PhD thesis, Université Montpellier 2, 2011.

[26] E. Soderstrom and P. Mendez. Humping mechanisms present in high speed welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(5) :572–579, 2006.

[27] M. H. Cho and D. F. Farson. Understanding bead hump formation in gas metal arc welding using a numerical simulation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 38 B :305–319, april 2007.

[28] R. Fabbro. Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 43, 2010.

[29] T.W. Eagar. Welding and joining : Moving from art to science. *Welding Journal*, 74(6) :49–55, 1995.

[30] T.W. Eagar. Physics of arc welding. In *AIP/AISI Conf. on Applications of Physics in the Steel Industry*, 1981.

[31] J.F. Lancaster. *Physics of welding.* Pergamon Press, 1986.

[32] T. DebRoy and S.A. David. Physical processes in fusion welding. *Reviews of Modern Physics*, 67(1) :86–112, January 1995.

[33] R. Blondeau. *Métallurgie et mécanique du soudage.* Hermes Science Publication, 2001.

[34] J. Chapuis, E. Romero, F. Soulié, C. Bordreuil, and G. Fras. Behaviour of spreading molten metal drops deposited by fusion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 48 :29–36, 2013.

[35] J. Chapuis, E. Romero, F. Soulié, and C. Bordreuil. Experimental analysis of droplet-gas interaction during gmaw process. In *9th International Trends in Welding Research Conference*, 2013.

[36] E. Romero, J. Chapuis, C. Bordreuil, F. Soulié, and G. fras. Image processing and geometrical analysis for profile detection during pulsed gas metal arc welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 227(3) :396–406, 2013.

[37] A. Traidia and F. Roger. Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current gta welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 :2163–2179, 2011.

[38] M. Dal, P. Le Masson, and M. Carin. Estimation of fusion front in 2d axisymmetric welding using inverse method. *International Journal of Thermal Sciences*, 55 :60–68, 2012.

[39] X. Kong, O. Asserin, S. Gounand, P. Gilles, J.M. Bergheau, and M. Medale. 3d finite element simulation of tig weld pool. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*, 33 :12025–12032, 2012.

[40] O. Desmaison, M. Bellet, and G. Guillemot. A level set approach for the simulation of the multipass hybrid laser/gma welding process. *Computational Materials Science*, 91 :240–250, 2014.

[41] S. Chen, G. Guillemot, and C.-A. Gandin. 3d coupled cellular automaton (ca) finite element (fe) modeling for solidification grain structures in gas tungsten arc welding (gtaw). *ISIJ International*, 54(2) :401–407, 2014.

[42] P.W. Bridgman. *Dimensional analysis.* Yale University Press, 1922.

[43] G.I. Barenblatt. *Scaling.* Cambridge Texts in Applied Mathematics, 2003.

[44] A. Block-Bolten and T.W. Eagar. Metal vaporization from weld pools. *Metallurgical Transactions B*, 15B :461–469, Septembre 1984.

[45] G.J. Dunn, C.D. Allemand, and T.W. Eagar. Metal vapors in gas tungsten arcs : Pat i. spectroscopy and monochromatic photography. *Metallurgical Transactions A*, 17A :1851–1863, 1986.

[46] E. W. Kim, C. Allemand, and T. W. Eagar. Visible ligth emissions during gas tugnsten arc welding and its application to weld image improvement. *Welding Journal*, 66 :369s–377s, 1987.

[47] S. Unnikrishnakurup, S. Rouquette, F. Soulié, and G. Fras. Multi-physics modeling of gtaw process and experimental validation for investigating the weld pool formation. In *10th International seminar Numerical Analysis of weldability*, 2013.

[48] S. Unnikrishnakurup. *Static GTAW : experimental and numerical investigations and heat flux parameters estimation.* PhD thesis, Université Montpellier 2, 2014.

[49] R. Sahoo, T. DebRoy, and M.J. McNallan. Surface tension of binary metal surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy. *Metallurgical Transactions B*, 19B :483–491, 1988.

[50] A. Berthier, P. Paillard, M. Carinand F. Valensi, and S. Pellerin. Tig and a-tig welding experimental investigations and comparison to simulation part 1 : Identification of marangoni effect. *Science and Technology of Welding and Joining*, 17(8) :609–615, 2012.

[51] J. Chapuis, E. Romero, F. Soulié, C. Bordreuil, and G. Fras. Dynamic behaviour of the weld pool in stationary gmaw. In *Proc. of the Int. Conf. on Advances in Welding Science and Technology for Construction, Energy and Transportation*, pages 39–46, 2010.

[52] A.-L. Biance, C. Clanet, and D. Quéré. First steps in the spreading of a liquid droplet. *Physical Review E*, 69 :1–4, 2004.

[53] A. Chiocca, F. Soulié, F. Deschaux-Beaume, and C. Bordreuil. In-situ observation and modelling of solidification and fluid flow on gtaw process. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 84(1) :012028, 2015.

[54] A. Chiocca, F. Soulié, F. Deschaux-Beaume, and C. Bordreuil. In-situ observations and measurements during solidification of cuni weld pools generated by spot gas-tungsten arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, in press :9 p., accepté.

[55] Ch.-A. Gandin, G. Guillemot, B. Appolaire, and N.T. Niane. Boundary layer correlation for dendrite tip growth with fluid flow. *Materials Science and Engineering A*, 342 :44–50, 2003.

[56] A.N. Magunov. Spectral pyrometry (review). *Instruments and Experimental Techniques*, 52(4) :451–472, 2009.

[57] M. Tanaka, K. Waki, S. Tashiro, K. Nakata, E. Yamamoto, K. TYamazai, and K. Suzuki. Visualizations of 2d temperature distribution of molten metal in arc welding process. In *Transactions of JWRI*, volume 38, 2009.

[58] K. Yamazaki, E. Yamamoto, K. Suzuki, F. Koshiishi, S. Tashiro, M. Tanaka, and K. Nakata. Measurement of surface temperature of weld pools by infrared two colour pyrometry. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(1) :40–47, 2010.

[59] M. Muller, R. Fabbro, H. El-Rabii, and K. Hirano. Temperature measurement of laser heated metals in highly oxidizing environment using 2d single-band and spectral pyrometry. *Journal of Laser Applications*, 24(2) :1–11, 2012.

[60] J. J. Lowke. Physical basis for the transition from globular to spray modes in gas metal arc welding. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 42 :135204, 2009.

[61] J.W.S. Rayleigh. On the capillary phenomena of jets. *Proceedings of the Royal Society of London*, 29(196-199) :71–97, 1879.

[62] H. Lamb. *Hydrodynamics*. Cambridge University Press, 1895.

[63] E. Becker, W.J. Hiller, and T.A. Kowalewski. Experimental and theoretical investigation of large-amplitude oscillations of liquid droplets. *Journal of Fluid Mechanics*, 231 :189–210, 1991.

[64] E. Becker, W.J. Hiller, and T.A. Kowalewski. Nonlinear dynamics of viscous droplets. *Journal of Fluid Mechanics*, 258 :191–216, 1994.

[65] A. Moradian and J. Mostaghimi. Measurement of surface tension, viscosity, and density at high temperatures by free-fall drop oscillation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 39(2) :280–290, 2008.

[66] S. Subramaniam, D. R. White, D. J. Scholl, and W. H. Weber. In situ optical measurement of liquid drop surface tension in gas metal arc welding. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 31(16) :1963–1967, 1998.

[67] S. Subramaniam and D.R. White. Effect of shield gas composition on surface tension of steel droplets in a gas-metal-arc welding arcs. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 32B :313–318, 2001.

[68] B. Bachmann, E. Siewert, and J. Schein. In situ droplet surface tension and viscosity measurements in gas metal arc welding. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 45(17) :175202, 2012.