



**HAL**  
open science

# Etude expérimentale du mouvement hydrodynamique d'un bain métallique et de sa production de vapeurs sur une configuration de soudage TIG

Marine Stadler

► **To cite this version:**

Marine Stadler. Etude expérimentale du mouvement hydrodynamique d'un bain métallique et de sa production de vapeurs sur une configuration de soudage TIG. Physique des plasmas [physics.plasm-ph]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2016. Français. NNT : 2016TOU30019 . tel-01386578

**HAL Id: tel-01386578**

**<https://theses.hal.science/tel-01386578>**

Submitted on 24 Oct 2016

**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 Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

---

**Présentée et soutenue par :**

**Marine Stadler**

Le vendredi 18 mars 2016

**Titre :**

Etude expérimentale du mouvement hydrodynamique d'un bain métallique et de sa production de vapeurs sur une configuration de soudage TIG

---

ED GEET : Ingénierie des PLASMAS

**Unité de recherche :**

LAPLACE - UMR5213

**Directeur(s) de Thèse :**

Jean-Jacques Gonzalez, Directeur de recherche, CNRS, Toulouse  
Mathieu Masquère, Maître de conférences, Université Toulouse III

**Rapporteurs :**

Jean-François Coudert, Professeur, Université de Limoges  
Stéphane Pellerin, Professeur, Université d'Orléans

**Autre(s) membre(s) du jury :**

Jean-Pascal Cambronne, Professeur, Université Toulouse III  
Isabelle Choquet, Associate Professor, University West (Suède)  
Pierre Freton, Maître de conférences (HDR), Université Toulouse III







# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble du jury pour avoir accepté d'évaluer mes travaux de thèse. Merci pour l'attention portée à ce travail, les remarques constructives et les intéressantes discussions qui ont suivi.

Merci à Jean-Jacques Gonzalez, Mathieu Masquère et Pierre Freton pour leur encadrement durant ces trois années de thèse. Je les remercie pour leur confiance, leur soutien, leur optimisme et leur bonne humeur. Je tiens à les remercier pour leur grande disponibilité et pour les discussions enrichissantes.

Je remercie également les autres membres de l'équipe pour leur accueil chaleureux ainsi que les membres du laboratoire qui ont permis de mener à bien ce projet.

Merci également à tous les doctorants que j'ai pu rencontrer et côtoyer pour les bons moments passés ensemble. Je souhaite remercier spécialement mes « deux compagnons de galère du bureau d'à côté » pour leur soutien sans faille et leur solidarité.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leurs encouragements, leur bienveillance et leur réconfort. Merci d'avoir pris soin de moi.



# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>5</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>7</b>
<b>Préambule</b> .....	<b>11</b>
<b>CHAPITRE 0 - Introduction générale</b> .....	<b>13</b>
I. Généralités sur le soudage .....	15
II. Objectifs de l'étude .....	26
III. Dispositifs expérimentaux .....	26
IV. Conclusion .....	30
<b>CHAPITRE 1 - Étude du plasma</b> .....	<b>31</b>
I. Les travaux théoriques et expérimentaux .....	33
II. Spectroscopie d'émission .....	38
III. Mise en œuvre expérimentale .....	44
1. Présentation du dispositif optique .....	44
2. Caractéristiques du système optique .....	49
IV. Application .....	52
1. Vapeurs métalliques .....	52
2. Température de la décharge .....	56
V. Conclusion .....	63
<b>CHAPITRE 2 - Étude de l'interface arc-liquide</b> .....	<b>65</b>
I. Comportement du bain liquide .....	67
1. Forces surfaciques .....	67
2. Forces internes au bain .....	69
II. Caractérisation de l'interface .....	71
III. Étude de la surface du bain métallique .....	74
1. Mise en œuvre expérimentale .....	74
2. Développement d'outils pour l'estimation des vitesses en surface du bain métallique .....	75
3. Validation .....	76
4. Application .....	80
5. Discussion .....	85
IV. Conclusion .....	87



<b>CHAPITRE 3 - Étude du matériau .....</b>	<b>89</b>
I. Caractérisation de la zone fondue : les travaux théoriques et expérimentaux.....	91
II. Étude temporelle de la zone fondue.....	94
1. Mise en œuvre expérimentale.....	94
2. Détail d'un cas.....	99
III. Influence des paramètres opératoires.....	111
IV. Conclusion.....	133
<b>Conclusions et perspectives .....</b>	<b>135</b>
<b>Références .....</b>	<b>139</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>145</b>
1. Choix d'une température limite pour le calcul de l'énergie consacrée à la fusion du métal ...	147
2. Détail des grandeurs estimées (1).....	149
3. Détail des grandeurs estimées (2).....	151
4. Profils de la zone fondue selon le cas étudié.....	152





# Préambule

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'équipe Arc Électrique et Procédés Plasmas Thermiques du laboratoire Laplace de Toulouse. Depuis de nombreuses années, cette équipe s'intéresse aux phénomènes d'interaction entre un plasma d'arc et les matériaux. De cet intérêt sont nées de nombreuses études liées à différentes applications industrielles telles que les torches de découpes ou les disjoncteurs basse et haute tension. Les phénomènes impliqués dans l'interaction d'un arc avec un matériau nécessitent d'être étudiés en amont pour pouvoir s'orienter ensuite vers l'amélioration de ces systèmes et procédés et répondre au mieux aux enjeux industriels. De cette manière, l'interaction arc-matériau a souvent été étudiée sur une configuration à arc transféré, permettant également la validation des modèles développés dans l'équipe. Ces travaux de thèses poursuivent les études réalisées jusqu'alors en s'orientant vers le procédé industriel associé : le soudage TIG.

Le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) est un procédé de soudage très utilisé dans les domaines de l'aéronautique et de l'industrie nucléaire. La maîtrise de la qualité des soudures pour garantir la sûreté des assemblages et l'optimisation du procédé sont des problématiques essentielles. Pour répondre à ces préoccupations, il est donc nécessaire de comprendre les phénomènes régissant le procédé, dans le plasma, dans le matériau et à l'interface arc/liquide. Ceci passe par un important travail expérimental de caractérisation et de compréhension de ces phénomènes. Les problématiques liées à cette application et les différents objectifs qui ont été choisis pour ces travaux de thèse sont décrits dans le *Chapitre 0*. Chaque axe d'investigation fait l'objet d'un chapitre :

- le *Chapitre 1* s'intéresse à l'étude du plasma,
- le *Chapitre 2* concerne l'étude de l'interface entre l'arc et le liquide,
- le *Chapitre 3* étudie le matériau après son interaction avec l'arc.

Une revue des travaux de la littérature ainsi que les connaissances théoriques associées sont présentées au sein de chaque chapitre. Les méthodes expérimentales mises en place sont ensuite décrites. Enfin les résultats obtenus sont présentés, discutés et des perspectives d'amélioration sont proposées.



# **CHAPITRE 0 - Introduction générale**



Ce chapitre a pour but d'introduire le travail effectué au cours de ces trois années de thèse. L'histoire du soudage permettra dans un premier temps d'appréhender l'apparition des différents procédés. Un intérêt particulier est porté au procédé TIG qui fait l'objet de ces travaux de thèse ainsi qu'aux procédés dérivés du TIG développés pour pallier les défauts du procédé classique. Au cours de ce chapitre, un historique, les différents procédés de soudage ainsi que certaines définitions relatives à la soudure sont détaillés de manière à définir le contexte de cette étude et la place du procédé TIG au sein de la communauté du soudage. Ce chapitre permet dans un second temps de présenter les axes d'investigations choisis dans ce travail de thèse. Enfin, dans une troisième partie, les configurations expérimentales utilisées sont détaillées.

## **I. Généralités sur le soudage**

*Références* : [Mil06][Esa1][Wem12].

Le *soudage* se définit comme un procédé d'assemblage permanent de deux ou plusieurs pièces par fusion localisée du métal à des températures adaptées avec ou sans application de pression et avec ou sans apport de métal.

Le travail du métal est l'une des premières formes de travail découvert par l'homme. Elle remonte au temps où il remarqua qu'il était possible de façonner une pièce de cuivre ou de fer en la martelant avec une autre. Au fil du temps, la découverte de nouveaux métaux a naturellement conduit les hommes à développer leurs outils (marteaux, forge, enclume) et leurs techniques pour le modelage et l'assemblage de métaux. Au milieu du XVIIIème siècle, la révolution industrielle apporte de nombreux changements dans le domaine de la métallurgie. Le développement de machines semi-automatiques permet une augmentation de la productivité. Cependant, un nouveau besoin se fait sentir : une source d'énergie « non-humaine ». Avec une source d'électricité et suffisamment de combustibles, de nouvelles inventions voient le jour mais il faut environ cent ans pour que la révolution industrielle atteigne son apogée. Au début du XIXème siècle, Edmund Davy découvre l'acétylène et Humphrey Davy produit, au cours d'expériences sur une pile électrique, un arc électrique entre deux bâtonnets de charbon. Davy est le premier à considérer l'arc électrique comme une source potentielle de lumière et en 1809 il montre qu'il est possible de maintenir un arc électrique pendant un temps assez long. C'est au milieu du XIXème siècle que les générateurs d'électricité sont inventés et développés. Avec la commercialisation de ce type d'appareils, le soudage électrique se développe assez rapidement. Le premier brevet français de soudage à l'arc revient à Auguste de Meritens en 1881 qui réalise l'assemblage de deux plaques de plomb avec un arc au carbone. Nikolai Bernardos et Stanislav Olszewski voient alors la possibilité d'utiliser l'arc électrique comme source de chaleur pour joindre des métaux ayant des températures de fusion élevées. Après environ quatre années de recherche, ils déposent en 1885 un brevet pour un procédé de soudage utilisant des électrodes de carbone et une source de courant. Ce brevet précise le type d'électrodes utilisées : elles peuvent être « pleines » ou « creuses », ces dernières étant remplies de poudre métallique fondant durant le procédé et se mélangeant au bain de soudure. Malgré cela, l'utilisation d'électrode non métallique ne permet pas de leur accorder la paternité du soudage



métallique à l'arc. Cette invention revient à Nikolay Gavrilovich Slavyanov qui décrit dans une publication de 1888 le soudage à l'arc avec des électrodes métalliques. Il précise qu'il s'agit d'unir deux pièces en coulant du métal entre l'espace qui les sépare. Les équipements de soudage se développent rapidement et en 1889, Charles Coffin dépose un premier brevet pour un équipement de soudage bout à bout puis un second en 1890 pour un équipement de soudage statique (spot welding) en ignorant tout des travaux de Slavyanov en Russie. Pour pallier les défauts liés à l'utilisation d'électrodes métalliques qui ont tendance à produire un arc instable, Oscar Kjellberg, suédois et futur fondateur de la société ESAB, donne naissance à la première électrode enrobée en 1907. Le développement des technologies de soudage progresse lentement jusqu'à la première guerre mondiale. À partir de là, le soudage n'est plus uniquement vu comme une technique de réparation mais devient nécessaire dans les travaux de construction. La recherche et le développement se poursuivent dans les années 1920 avec l'apparition de nouveaux enrobages pour les électrodes et de cœurs fusibles de composition la plus proche possible de celle du métal de base à souder. Le soudage à l'arc sous atmosphère inerte voit le jour au début des années 1930 avec Henry Hobart et Philip Devers. Le procédé n'est pourtant pas développé à ce moment, du fait des coûts importants de production d'argon et d'hélium. De plus, le procédé n'est pas encore reconnu comme une avancée majeure dans l'industrie du soudage. C'est en 1939 qu'il est confié à Russel Meredith la tâche de souder la structure d'ailes d'avion. Jusqu'alors ce type d'assemblage était effectué avec des torches à oxygène (*soudage oxyacétylenique*). Il est demandé à Russel Meredith de mettre en place un procédé entièrement nouveau, plus rapide et plus simple d'utilisation qui produirait des soudures de meilleure qualité. Avec l'arrivée de la seconde guerre mondiale, la question du soudage de l'aluminium devient essentielle notamment dans l'aéronautique. Les recherches sur de nouveaux procédés et techniques de soudage s'intensifient alors. Russel Meredith développe un procédé utilisant un gaz inerte et une électrode non-consommable. Le brevet est accepté en 1942 et ce procédé porte alors le nom de Heliarc, connu aujourd'hui sous le nom de procédé TIG (Tungsten Inert Gas). Après la guerre, l'utilisation du magnésium et de l'aluminium augmente considérablement. Le soudage de plaques d'épaisseur supérieure à 6mm nécessitant un pré-chauffage pour l'obtention de soudure de qualité en TIG, de nouveaux procédés émergent pour répondre à cette problématique : c'est l'apparition du soudage MIG (Metal Inert Gas) en 1948. S'en suit une amélioration constante des procédés existants avec l'utilisation de gaz dit actifs donnant naissance à des procédés tels que l'A-TIG (Activated Tungsten Inert Gas) ou le MAG (Metal Active Gas). Dans les années 1970, un nouveau procédé hybride combinant les effets du laser et ceux de la soudure à l'arc voit le jour.

L'histoire du soudage montre donc la diversité des techniques développées et la constante nécessité d'évolution. Les techniques de soudage à l'arc peuvent être séparées en trois catégories. La première regroupe les méthodes utilisant des électrodes enrobées tandis que la seconde s'appuie sur des électrodes non fusibles avec un apport de métal extérieur. Le procédé TIG appartient à la seconde catégorie. La dernière concerne la soudure à électrodes fusibles dans laquelle figurent le soudage MIG et MAG. Ces différents procédés seront tout d'abord présentés, de manière non

exhaustive, en détaillant plus précisément le procédé TIG qui fait l'objet de cette étude. Puis, à partir des défauts inhérents au soudage TIG, quelques-uns de ses procédés dérivés seront décrits en mentionnant leurs apports respectifs.

### **Soudage à l'électrode enrobée**

Le soudage à l'électrode enrobée est l'un des modes opératoires de soudage à l'arc le plus répandu. Il s'agit d'une méthode de soudage manuelle. L'électrode est constituée d'un fil à cœur d'acier et d'un flux d'enrobage. Un arc électrique de faible voltage mais de forte intensité fait fondre le métal de base et l'électrode. Lors de la fusion, le flux d'enrobage forme une couche protectrice (*laitier*) qui évite l'oxydation du métal. Une fois solidifiée, cette couche protectrice est retirée. Cette technique nécessite un travail de haute précision car la quantité de métal déposée est en grande partie liée à la puissance mise en jeu (*figure 0.1(a)*).

### **Soudage sous flux en poudre**

Le soudage à l'arc sous flux en poudre constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe un fil électrode fusible amené par un dévidoir à une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite. Cette dernière a des effets comparables au flux d'enrobage et est apportée directement dans la zone d'arc, mais indépendamment de l'électrode. Ce procédé est aussi appelé soudage à l'arc submergé (*figure 0.1(b)*).

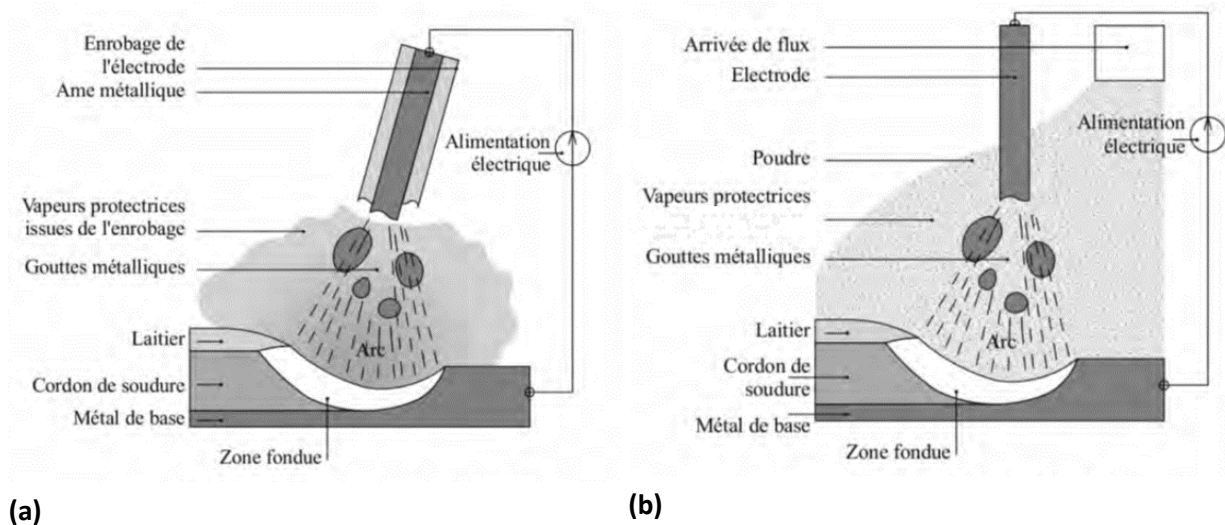


Figure 0.1 : Schéma des procédés (a) à l'électrode enrobée (b) et sous flux de poudre [Mes04][Mou13-a]

### **Procédés MIG et MAG**

Les procédés MIG et MAG (*figure 0.2*) sont des techniques semi-automatiques utilisant un flux gazeux. L'arc est amorcé dans une atmosphère de protection entre un fil fusible et les pièces à assembler. Le fil fusible est amené au niveau de l'arc par un système automatisé constituant ainsi l'apport de métal pour effectuer la soudure. Le gaz est insufflé dans une buse concentrique à l'électrode afin de protéger le bain de fusion de toute oxydation. Si le gaz utilisé pour créer l'atmosphère d'ionisation est inerte, il s'agit du procédé MIG tandis que s'il est actif (mélange d'argon et de dioxyde de carbone généralement), c'est le procédé MAG. Dans les procédés

MIG/MAG, le transfert de matière (fil) vers la plaque à souder peut se faire de différentes manières : pulvérisation axiale (spray arc), arc court ou arc globulaire. Ces différents régimes sont obtenus à partir des paramètres de l'alimentation (tension, courant). Ces procédés ont pour avantage d'avoir une vitesse de soudure élevée mais le risque de collage des électrodes n'est pas à négliger.

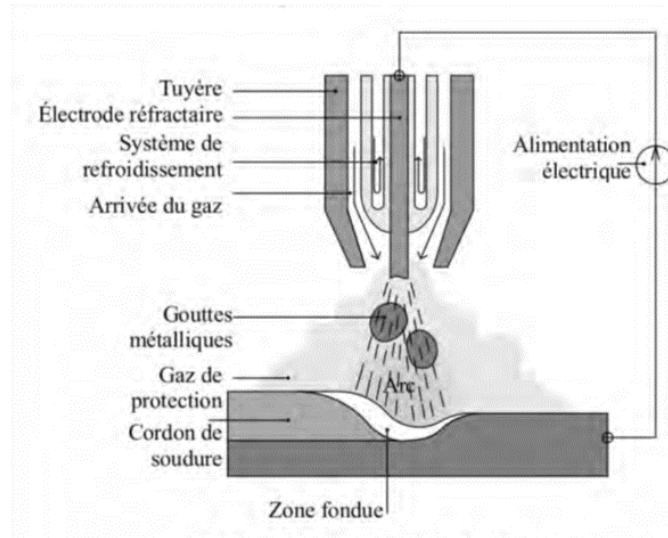


Figure 0.2: Schéma du procédé à électrode fusible sous protection gazeuse (MIG/MAG) [Mes04][Mou13-a]

### **Procédé TIG**

Le soudage à électrode réfractaire, plus souvent appelé TIG (Tungsten Inert Gas), se différencie de la technique MIG par son apport de métal. Dans ce procédé, l'arc est généré entre une électrode en tungstène non fusible et les pièces à souder. L'apport de métal se fait de manière externe au moyen d'une baguette métallique. Il faut noter que ce procédé peut également s'utiliser sans apport de métal pour des épaisseurs à souder inférieures à 1.5mm. Un gaz inerte est soufflé au travers d'une buse pour éviter la présence d'oxygène dans le métal fondu et éviter l'oxydation de l'électrode réfractaire (figure 0.3).

Trois types de courant sont utilisés : continu à polarité directe, continu à polarité indirecte et alternatif. En général, le courant continu à polarité directe (pouvant aller jusqu'à 500 A) est utilisé : la polarité négative est affectée à l'électrode en tungstène. L'utilisation du courant continu à polarité inverse entraîne des effets de soudage différents. Dans cette configuration, la pièce à souder constitue la cathode et il y a un effet de décapage de la matière. L'utilisation en courant alternatif associe les deux modes précédents. Il est en pratique utilisé pour le soudage de matériaux légers qui s'oxydent facilement. La phase de décapage permet alors des conditions de soudage favorable.

Des soudures de très haute qualité peuvent être obtenues avec ce procédé car le bain de fusion est protégé par le gaz inerte de toute contamination par l'air ambiant. Les gaz de protection utilisables sont l'argon et l'hélium. Un mélange des deux (Arcal) est également possible et permet d'obtenir un compromis entre leurs effets respectifs. Par rapport à l'hélium, l'argon à l'avantage de permettre un amorçage à l'arc plus facilement grâce à son plus faible potentiel d'ionisation. De plus, il produit un arc plus stable, nécessite un débit moindre pour une protection identique, et sa production par distillation est moins coûteuse. Cependant, l'hélium dont le potentiel d'ionisation est

plus élevé permet d'obtenir un milieu plus énergétique. Le dépôt d'énergie vers la plaque à souder est donc plus important ce qui donne une meilleure pénétration et permet ainsi de souder des plaques d'une épaisseur plus importante pour un même courant [Caz80]. Il existe de très nombreuses buses qui diffèrent par leurs tailles et leurs formes. Le matériau est généralement de la céramique et de l'oxyde d'alumine. Une buse en alumine est légèrement plus fragile, mais supporte des courants et des températures plus élevées. En règle générale, le diamètre intérieur d'ouverture de la buse est quatre fois supérieur au diamètre de l'électrode. Le diffuseur est un accessoire qui assure un écoulement homogène du gaz et protège mieux l'électrode et le bain de métal. Il permet ainsi une réduction du débit de gaz de 50%, une augmentation de la longueur de sortie de l'électrode de 15 à 20mm au lieu de 5mm, ce qui rend plus facile le suivi de soudage permettant ainsi un meilleur accès de soudage dans les espaces restreints. Il élimine également le risque de défaut dû aux porosités par mauvaise protection gazeuse [Esa2].

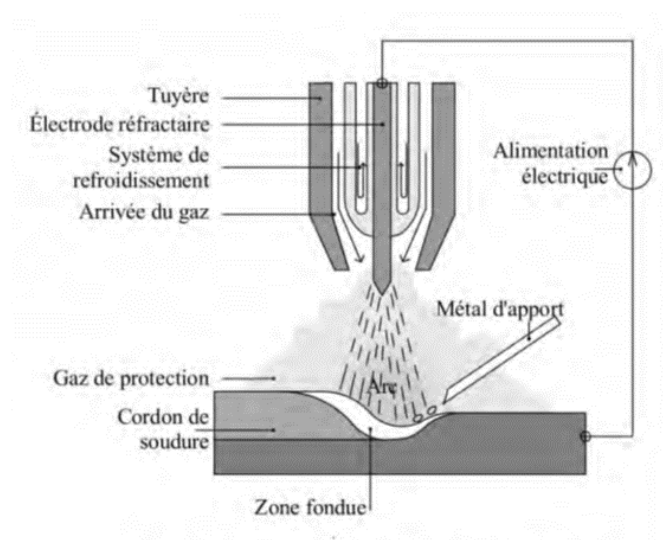


Figure 0.3 : Schéma du procédé à électrode réfractaire (TIG) [Mes04][Mou13-a]

Pour réaliser une soudure de qualité il convient également de sélectionner le type d'électrode en tungstène à utiliser. Différents types d'électrodes existent : tungstène pur ou tungstène avec addition d'éléments (thorium, lanthane, cérium). L'addition de ces éléments produit une augmentation de l'émission d'électrons en réduisant le travail de sortie permettant un meilleur amorçage et réamorçage de l'arc et une meilleure stabilité. Par ailleurs, les alliages allongent la durée de vie des électrodes et leur permet de supporter des intensités plus élevées. Ils permettent aussi de limiter les inclusions de tungstène dans le métal fondu. Dans la plupart des cas il est préférable de choisir la plus petite électrode possible afin d'obtenir une meilleure constriction de l'arc. Il faut pouvoir passer un maximum de courant dans l'électrode sans pour autant en provoquer la fusion. En cas de fusion du tungstène, celui-ci risque de contaminer la soudure. Les inclusions dures de tungstène affectent la solidité de la soudure. Dans ce cas, une électrode de diamètre supérieur doit être utilisée. La pointe de l'électrode doit être correctement affûtée pour éviter des instabilités de l'arc. Les pointes peuvent être affûtées suivant différents angles (15 à 180°) en notant que plus

l'angle d'affutage est faible, plus le plasma sera constricté proche de la cathode et étendu proche anode.

Le diamètre du fil d'apport, s'il y en a, est quant à lui déterminé par l'épaisseur de métal à souder. Il doit être suffisamment épais pour remplir le joint.

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité (acier inoxydable, métaux non ferreux) ou affectés par la corrosion. Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au matériau et le dépôt du métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Le métal d'apport n'est donc pas surchauffé, l'arc est plus stable et conduit à une soudure sans soufflure<sup>1</sup>. Ce procédé ne cause pas de projections, peut s'exécuter dans toutes les positions et permet d'obtenir des soudures lisses et sans formation de laitier. Cependant la vitesse de soudage reste réduite et demande une grande dextérité de la part du soudeur entraînant une productivité plus faible que dans les autres procédés. Il s'applique bien au soudage de plaques minces (de 0.5 à 6mm) mais convient moins aux pièces épaisses, par rapport aux autres procédés possédant un taux de transfert de chaleur plus élevé. Pour souder des épaisseurs plus importantes, le TIG peut être associé au MIG/MAG ou au soudage à électrode enrobée. Des procédés dérivés du TIG ont donc vu le jour pour augmenter la pénétration des soudures au sein d'un même procédé plutôt que d'en associer plusieurs.

### **Procédés dérivés du TIG**

Dans cette section, différents procédés dérivés du TIG sont présentés :

- TIG Activé (A-TIG),
- Procédé plasma,
- TIG à double électrode,
- TIG à double flux,
- TIG à courant pulsé,
- Procédé TOPTIG.

Le procédé TIG est largement utilisé dans l'industrie. Cependant, sa faible capacité de pénétration l'empêche de souder des structures épaisses en un seul passage. Le procédé **TIG Activé** (A-TIG) permet d'augmenter la pénétration du bain métallique en ajoutant une fine couche d'un flux actif ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,...) en surface de la pièce à souder. Durant le soudage, l'énergie déposée par l'arc fait fondre le flux et en vaporise une partie. Deux théories concernant ce mécanisme ont été retenues : la constriction de l'arc et le renversement des forces de Marangoni présentes dans le bain. La constriction résulte de la capture d'électrons en périphérie de l'arc par les éléments à forte électronégativité. La capture électronique peut avoir lieu seulement dans les régions les plus froides de l'arc (i.e. en périphérie) où le champ électrique est plus faible. Au centre de l'arc, les températures élevées et le fort champ électrique qui y règne sont propices aux ionisations. Ainsi, la circulation du courant est réduite à la région centrale de l'arc et la densité de courant dans le plasma et à l'anode

---

<sup>1</sup> Bulles de gaz enfermées dans le cordon de soudure.

augmente, entraînant un arc plus étroit et un bain métallique plus profond [Mod00]. Il a également été montré que des éléments actifs tels que l'oxygène, le soufre et le sélénium modifient le signe du coefficient de tension de surface du bain métallique [How00]. En passant d'un signe négatif à positif, le mouvement de convection lié aux forces de Marangoni est modifié de l'extérieur vers l'intérieur. Dans ce cas, la profondeur du bain augmente considérablement. Par ailleurs, il a été précisé que seule une certaine quantité d'oxygène issue de la décomposition du flux actif modifie le coefficient de tension de surface. Une faible quantité, ou à l'inverse une grande quantité d'oxygène, n'a aucune influence sur la pénétration du bain [Lu02]. De plus certains additifs, comme l'alumine, n'auraient pas l'effet escompté puisqu'ils induiraient une pénétration plus faible que le procédé TIG classique [Tse11]. Le soudage TIG classique nécessite d'usiner les bords des matériaux (chanfrein) à souder qui ont une épaisseur supérieure à 3mm. Avec un procédé tel que le TIG Activé, des épaisseurs allant jusqu'à 12mm peuvent être soudées en un seul passage.

Le **procédé plasma** est un dérivé du procédé TIG vers les hautes densités d'énergie. Le principe de soudage est identique au procédé TIG mais à cela s'ajoute un effet de constriction de l'arc. La constriction de l'arc peut être faite de manière mécanique ou pneumatique. Dans le premier cas, l'arc est contraint de traverser une tuyère ayant pour effet d'augmenter la tension de la colonne d'arc par rapport à celle d'un arc libre de même intensité. Dans le cas d'une constriction pneumatique, le confinement de l'arc est obtenu en jouant sur le débit du gaz plasmagène contenu dans la tuyère centrale. Un second gaz, de même nature ou de nature différente de celui soufflé dans la tuyère centrale, circule entre cette dernière et la buse, jouant le rôle de gaz de protection. Deux types d'arc peuvent être distingués. Lorsque l'arc s'établit entre l'électrode et la tuyère, le fort débit de gaz central permet de le souffler à l'extérieur : on parle d'arc soufflé ou non transféré (*figure 0.4(a)*). A l'opposé, on parle d'arc transféré (*figure 0.4(b)*) lorsqu'il s'établit entre l'électrode et les pièces à assembler [Air1].

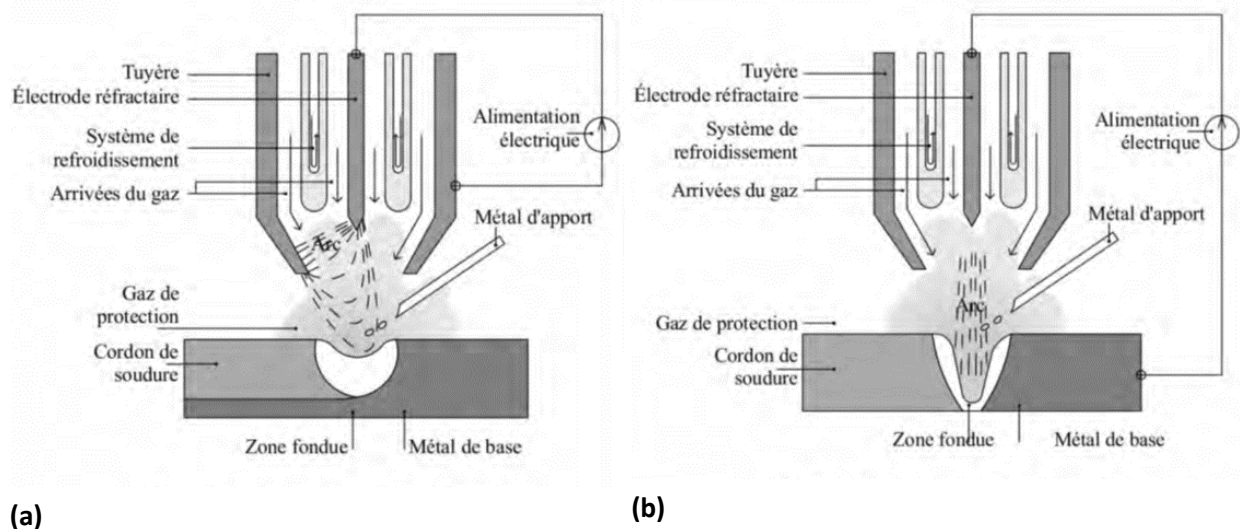


Figure 0.4 : Schéma du procédé (a) à arc non transféré et (b) à arc transféré [Mes04][Mou13-a]

Pour augmenter le transfert d'énergie en conservant un faible impact de la pression d'arc sur le bain métallique de manière à réduire certains défauts de soudure, le procédé **TIG à double électrode** a été développé. Deux électrodes espacées d'une dizaine de millimètres sont placées au sein d'une même torche et utilisées simultanément [Len06].

Il existe également des torches **TIG à double flux**. La torche est adaptée pour distribuer deux flux différents : un flux central et un flux de gainage (en périphérie de l'arc). Les gaz associés à ces flux peuvent être de même nature ou non, purs ou mélangés. A pénétration égale, moins d'énergie est nécessaire en TIG double flux, et il est possible d'augmenter la vitesse de soudage de 20 % par rapport au TIG simple [Air1]. Pour certaines utilisations où le flux central est composé de gaz inertes, cette méthode permet de préserver la détérioration de l'électrode réfractaire et d'augmenter le rapport profondeur/largeur [Li10]. Ces configurations de soudage TIG à double flux se rapprochent du soudage plasma à l'arc transféré mais la constriction de l'arc est moins marquée.

Dans la technique de soudage classique, des rugosités sont retrouvées dans les zones de fusion liées aux conditions thermiques dans lesquelles le métal s'est solidifié. Ceci entraîne souvent une moins bonne résistance aux contraintes mécaniques. Il est donc souhaitable de contrôler la solidification des soudures. Diverses méthodes ont été développées pour améliorer ce point. Parmi elles se trouve le **TIG à courant pulsé** dont le succès vient de sa facilité d'application et des faibles modifications à apporter aux équipements classiques. Le TIG pulsé est un procédé dans lequel le courant est variable dans le temps et dont l'utilisation favorise la stabilité de la décharge. De plus, il diminue le transfert de chaleur entre l'arc et la pièce à souder réduisant ainsi les défauts liés à la température. Contrairement au mode continu, le fait que le courant soit appliqué par pulse permet à la chaleur de se dissiper dans le matériau : la zone affectée thermiquement (ZAT) est plus étroite. Le soudage en mode pulsé conduirait à des structures plus fines augmentant ainsi la dureté de la soudure et ses propriétés d'élasticité. Les tensions résiduelles présentes dans la soudure seraient plus faibles que dans celles réalisées par le procédé classique [Kan11]. Cependant, l'utilisation du courant alternatif entraîne l'accumulation de vapeurs qui sont importantes pendant la phase de décapage. Ceci réduit la puissance totale transférée à l'anode et donc l'efficacité du procédé [Tra11].

Un autre procédé a été récemment développé dans le centre de recherche Air Liquide : le procédé **TOPTIG** (figure 0.5). Aujourd'hui la plupart des applications du soudage robotisées sont réalisées avec le procédé MIG/MAG. Ce procédé est très adapté, mais il présente un inconvénient majeur : la présence de projections affectant la qualité des joints. Dans ce nouveau procédé, le métal d'apport est amené à travers la buse de soudage directement dans l'arc avec un angle de 20° jusqu'à l'électrode, là où les températures sont les plus élevées. Ce concept garantirait un taux de dépôt important et un transfert de métal efficace. Contrairement au procédé MIG, le courant de soudage n'est pas transféré à travers le fil. Ainsi le courant de soudage et la vitesse du fil sont contrôlés indépendamment. Ce contrôle précis de l'énergie permettrait de réduire la zone affectée thermiquement et éviterait la déformation sur les pièces de fines épaisseurs [Air2].

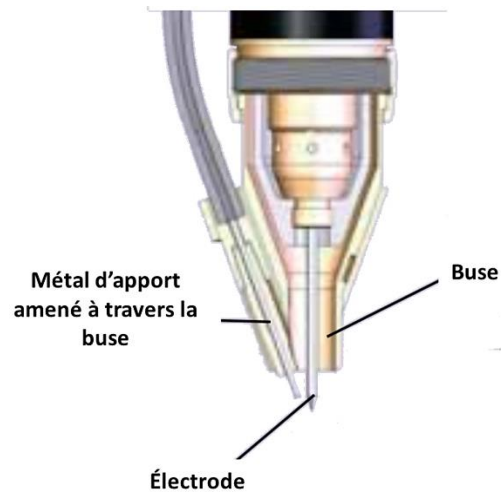


Figure 0.5 : Schéma du procédé TOPTIG développé par Air Liquide [Air2]

### Procédés hybrides

Dans les années 1980, un procédé hybride mêlant **TIG et laser** est apparu de manière à bénéficier des avantages des deux techniques [Ste80]. La combinaison de ces deux méthodes permet d'obtenir des vitesses de soudage plus élevées et de souder des épaisseurs de métal plus importantes. Selon l'apport énergétique des deux procédés impliqués, la soudure résultante aura un aspect différent. Si l'apport majoritaire provient de l'arc, le cordon obtenu sera large alors que si l'apport majoritaire est celui du laser, la pénétration sera favorisée [Leg10]. L'observation de la zone de fusion a permis de déduire que la présence du laser entraînait la constriction de l'arc à l'endroit où le laser pointait. Dans les années qui suivirent, les travaux se sont développés et ont fourni des explications plus précises : en ayant un effet préchauffant sur la surface à souder, le plasma d'arc augmente considérablement la capacité de la pièce à absorber l'énergie du laser. Il augmente ainsi l'efficacité du faisceau laser. Il a également été montré que la forme du bain métallique était une fonction de la puissance du laser [Lim04].

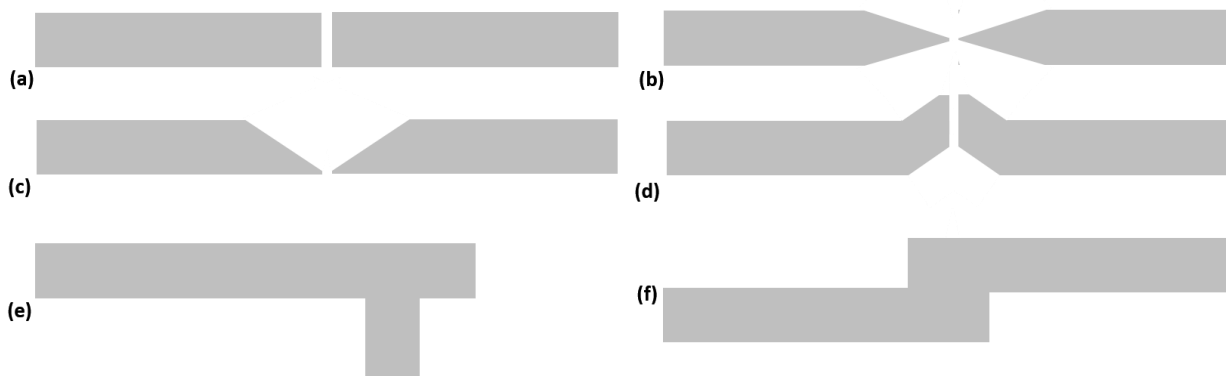
Cette technique hybride peut également être utilisée en mode pulsé. Le laser est appliqué pendant quelques millisecondes. Des études ont montré que la forme du pulse avait un fort impact sur la qualité des soudures [Son11].

De la même manière que les effets du laser et du TIG peuvent être combinés, l'association du procédé **plasma et TIG** permet d'envisager un gain de vitesse par rapport à l'un ou l'autre des procédés. Les caractéristiques propres aux deux procédés sont conservées : compacité et pénétration pour le procédé plasma associées à un cordon de soudure de très haute qualité assuré par le TIG. Cette association est réalisée en tandem et de manière automatisée. Une torche TIG ainsi qu'un dispositif d'apport de métal sont placés à l'arrière d'une torche plasma. Le procédé plasma assure la fusion de toute l'épaisseur du métal pendant que la torche TIG réalise une passe de finition simultanée. Cette association permet de réaliser des assemblages en une seule passe tout en réduisant l'apport de métal. Elle permet également de souder à grande vitesse et d'obtenir un cordon de soudure très propre, réduisant ainsi les post-traitements (meulage, polissage) [Air3].



La maîtrise des sources thermiques (arc électrique, laser, plasma) et l'automatisation des systèmes ont permis à ces procédés de gagner en fiabilité et en qualité de réalisation. Les ensembles mécano-soudés sont maintenant devenus irremplaçables dans de nombreuses applications. Selon les contraintes liées à ces applications, une distinction est faite si le métal d'apport permettant de réaliser la soudure est de nature différente de celle des pièces à assembler (*soudure hétérogène*) en opposition à une soudure réalisée avec un métal d'apport identique à celui des pièces à souder (*soudure autogène*). Différents types d'assemblages peuvent être rencontrés. Il en existe trois principaux types, ayant chacun ses particularités et répondant à des besoins bien précis :

- *l'assemblage bout à bout* : c'est la technique la plus courante et la plus facile à utiliser. La soudure est réalisée entre deux pièces plates disposées de façon parallèle (*figure.0.6(a)*). Si la soudure est réalisée sur la totalité de l'épaisseur, le terme de soudure à pénétration complète est affecté, sinon il s'agit d'une soudure à pénétration partielle. Un métal d'apport est parfois nécessaire mais les épaisseurs à souder ne peuvent dépasser 5mm. L'assemblage bout à bout peut nécessiter une préparation des bords. On parle alors de soudage bout à bout en chanfrein en X (*figure.0.6(b)*) ou V (*figure.0.6(c)*) ou à bords relevés (*figure.0.6(d)*) ;
- *l'assemblage d'angle* : comme son nom l'indique, il est utilisé pour assembler deux pièces d'angle. Les pièces sont disposées à angle droit (*figure.0.6(e)*) ;
- *l'assemblage en recouvrement* : il est utilisé lorsque deux pièces sont placées l'une sur l'autre et se chevauchent sur une certaine distance le long du bord. La soudure peut être effectuée sur une ou deux faces. C'est la technique la plus courante pour souder des plaques d'épaisseurs différentes (*figure 0.6(f)*).



*Figure 0.6 : Schéma représentant les principaux types d'assemblage*

Selon l'épaisseur des pièces à souder, le soudage nécessite parfois d'être réalisé en plusieurs fois. Il s'agit du *soudage multipasse* où le cordon de soudure est effectué par passages successifs de la torche, créant ainsi un empilement de métal jusqu'à atteindre l'épaisseur souhaitée. Quel que soit le type d'assemblage ou le procédé considéré utilisant la fusion des pièces métalliques, différentes zones liées au changement de phase du métal soudé apparaissent :

- le *métal de base* : il correspond au matériau dans la zone solide qui n'a pas été modifié par le dépôt d'énergie ;

- la *zone fondue* (ou *bain métallique*) : elle correspond à la zone liquide composée du métal de base et de l'éventuel métal d'apport. Les forces qui agissent en surface et à l'intérieur de cette zone mettent en mouvement le liquide métallique ce qui impacte sur la forme du bain ;
- la *zone affectée thermiquement* (ZAT) : c'est la partie solide du métal de base modifiée par l'augmentation de la température mais qui n'a pas fondu ;
- la *zone de transition liquide-solide* : c'est le reflet de la coexistence de la phase liquide et solide.

Ces différentes zones sont illustrées sur la figure ci-dessous.

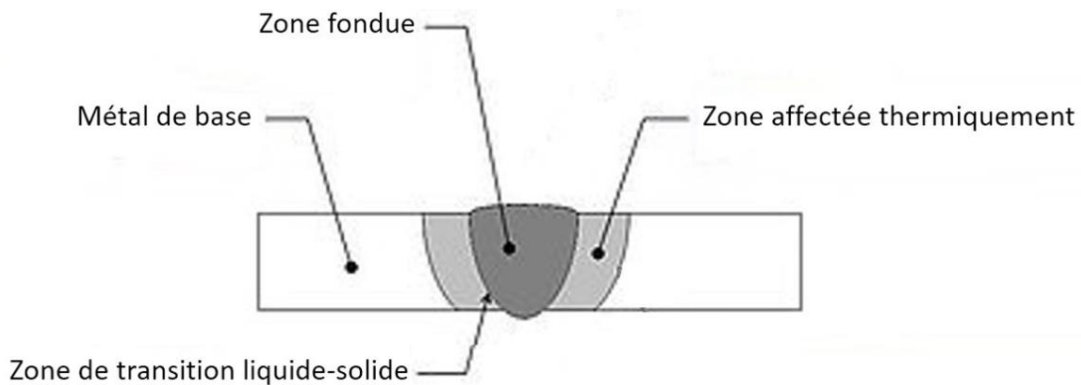


Figure 0.7 : Schéma représentant les différentes zones apparaissant dans le cordon de soudure

La qualité des soudures est caractérisée par la géométrie du bain métallique qui a un fort impact sur les propriétés mécaniques de la soudure. Une géométrie optimale nécessite de sélectionner les paramètres adéquats (nature du gaz, intensité du courant, longueur d'arc...). Les forces agissant en surface et à l'intérieur de la zone fondue durant la phase d'arc mettent en mouvement le liquide ayant ainsi des conséquences sur la forme du bain et la forme de la soudure obtenue. Ce point sera décrit plus en détail au *Chapitre 2*. Par ailleurs, différentes grandeurs géométriques caractérisent la zone fondue : largeur, profondeur (communément appelée *pénétration*). Pour estimer les dimensions d'une soudure, le rapport entre la largeur et la profondeur est souvent évalué.

Différentes méthodes de contrôles existent pour vérifier la qualité d'une soudure. Des moyens de contrôles non destructifs tels que la radiographie, les ultra-sons ou le ressuage sont utilisés. Ce dernier consiste à injecter un liquide coloré ou fluorescent qui s'infiltré dans les défauts et les met en évidence par un produit révélateur. Il permet notamment d'observer des défauts tels que des piqures, des fissures, des retassures... La qualité d'une soudure peut également être vérifiée par des méthodes destructives : coupe macro ou micrographique pour observer la forme de la soudure et les défauts internes ; traction et pliages de manière à tester la dureté, la résistance à la cassure et la fatigue des soudures. Les types de défauts pouvant apparaître lors du processus de soudage ne seront pas détaillés ici mais sont répertoriés et décrits dans les documentations industrielles [Esa3] ainsi que dans les récents travaux de thèse de *J Mougenot* [Mou13-a].

L'évolution permanente des procédés démontre le souhait de mettre en place des techniques de plus en plus efficaces en terme de productivité tout en maintenant une haute exigence de qualité pour garantir la sûreté des assemblages. Le procédé TIG a l'avantage de pouvoir être utilisé dans des endroits difficilement accessibles contrairement aux autres procédés et de fournir des soudures d'aspect et de qualité bien meilleurs. Ceci en fait donc un procédé de référence qui est utilisé dans des domaines sensibles : aéronautique, aérospatiale, industrie nucléaire. Pour garantir une sécurité suffisante dans ces assemblages, la compréhension des mécanismes physiques impliqués dans le procédé est donc un point essentiel. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans ce cadre.

## **II. Objectifs de l'étude**

L'objectif de ces travaux de thèse est de mettre en place des méthodes de diagnostic permettant une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans le transfert d'énergie lors de l'interaction arc-matériau sur une configuration de soudage TIG. Il s'agit également d'évaluer et d'analyser l'influence de certains paramètres opératoires impliqués dans le procédé (nature du gaz, intensité du courant, longueur de l'arc...) sur ces mécanismes. Durant le procédé TIG, le transfert d'énergie entre l'arc et le matériau donne naissance à un bain métallique qui est le siège de différents mouvements qui seront détaillés plus loin (*cf. Chapitre 2*). Ces mouvements ont une influence sur la forme de la soudure obtenue après solidification. Plusieurs axes de recherche ont été dégagés :

- l'étude de la colonne plasma pour estimer sa température selon les paramètres opératoires utilisés ainsi que l'analyse de la production de vapeurs métalliques issues de l'érosion du matériau sur le plasma;
- l'étude de l'interface arc-liquide pour l'estimation des vitesses en surface du liquide;
- l'étude du matériau après son interaction avec l'arc pour faire le lien entre le brassage dans le bain durant le procédé et les caractéristiques de la zone fondue observée après solidification.

L'équipe Arc Électrique et Procédés Plasmas Thermiques (AEPPT) du laboratoire LAPLACE s'intéresse à ces phénomènes d'interaction arc-matériau par le biais de la modélisation et de l'expérience. Un modèle 3D a été récemment développé au sein de notre équipe sur cette thématique [Mou13]. La caractérisation expérimentale du procédé devrait permettre également d'apporter des éléments de validation aux modèles déjà existants. Les configurations expérimentales utilisées dans ces travaux sont maintenant présentées.

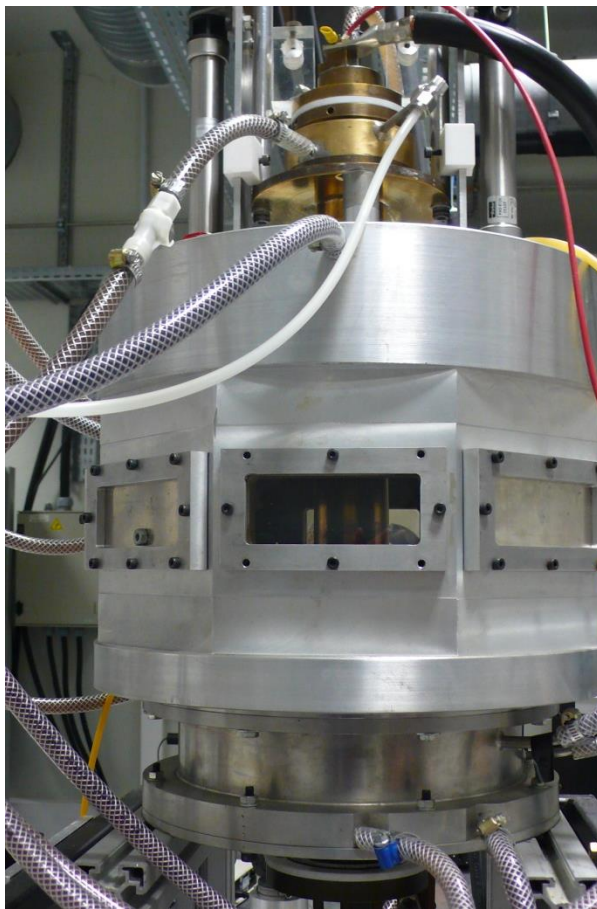
## **III. Dispositifs expérimentaux**

Plusieurs dispositifs expérimentaux ont été utilisés. Dans un premier temps, une configuration pouvant être qualifiée « d'académique » est présentée. Ce dispositif a été mis en place par le laboratoire lors de précédentes études et a permis d'appréhender ce travail. Par la suite, les méthodes développées ont été transposées et affinées sur une configuration réelle de soudage TIG.

**Configuration à arc transféré**

Le dispositif expérimental à arc transféré est constitué d'une chambre à arc, ou réacteur à arc transféré, et d'un système d'électrodes.

La chambre à arc est de forme octogonale (*figure 0.8(a)*). Avec un hublot en quartz par face, soit huit au total, il est possible d'observer l'arc, de réaliser des mesures spectroscopiques et d'accéder à l'intérieur du réacteur lors de la mise en place de l'expérience. Cette enceinte d'un diamètre de 30cm est constituée d'un alliage à base d'aluminium. Sur les parties supérieures et inférieures, une double paroi en acier inoxydable permet un refroidissement par circulation d'eau. L'arc est créé à l'intérieur entre une cathode pointe de tungstène thorié affûté à 60° de diamètre 6mm et une anode circulaire plane, le tout à pression atmosphérique (*figure 0.8(b)*).



(a)



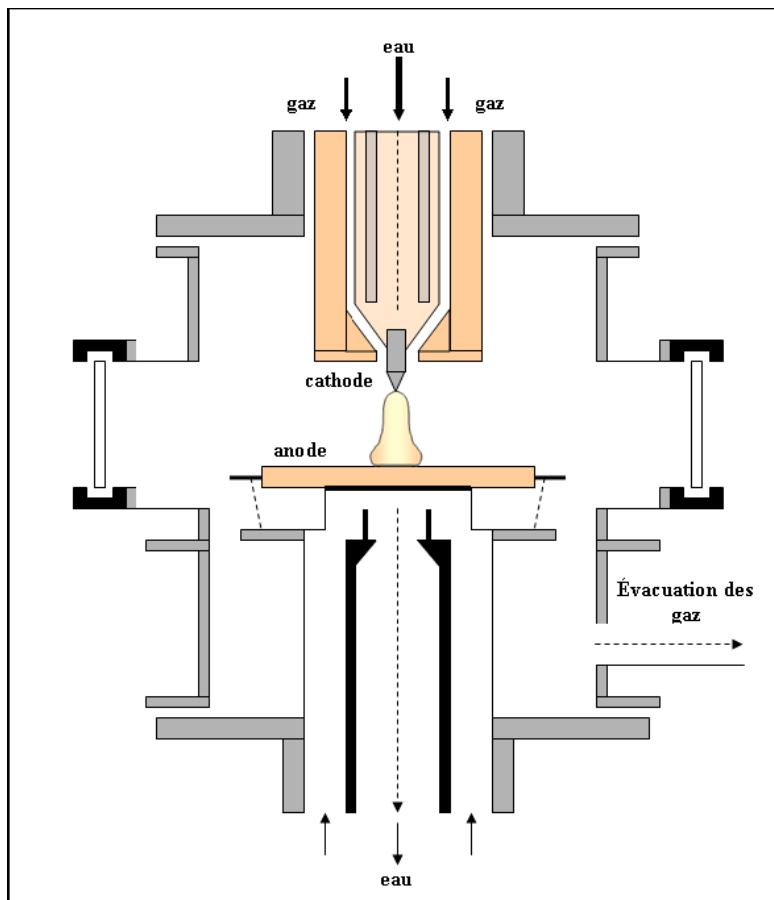
(b)

*Figure 0.8 : (a) Enceinte du réacteur à plasma (b) système d'électrodes*

Les électrodes sont également refroidies pour leur permettre de supporter les températures élevées du plasma. La totalité du système est refroidie par une circulation d'eau permettant de contrôler l'érosion des électrodes. Les refroidissements de la partie supérieure de l'enceinte et de la cathode, de la partie inférieure et de l'anode, sont effectués par deux circuits d'eau indépendants pour une plus grande efficacité. L'anode et la cathode sont refroidies par leur support respectif. Le support d'anode est fait de cuivre qui par sa forte conductivité thermique lui permet d'évacuer

efficacement la puissance thermique déposée par l'arc et ainsi de contrôler l'érosion du matériau d'anode.

Il a été mentionné précédemment que la chambre à arc fonctionnait à pression atmosphérique. Elle reste néanmoins étanche à l'air ambiant pour permettre l'injection d'un gaz plasmagène. Ce fluide est injecté verticalement le long de la cathode. Le débit du gaz est régulé par un débitmètre et peut être ajusté selon l'arc généré. Dans ces travaux, celui-ci sera fixé à 10l/min. L'arc pourra être généré dans de l'argon pur ou de l'Arcal (un mélange d'argon et d'hélium). L'évacuation des gaz chauds est réalisée à l'aide d'un tuyau placé au bas du réacteur et relié à une pompe d'extraction. Le système d'injection du gaz et leur évacuation est également indiqué sur la *figure 0.9*.



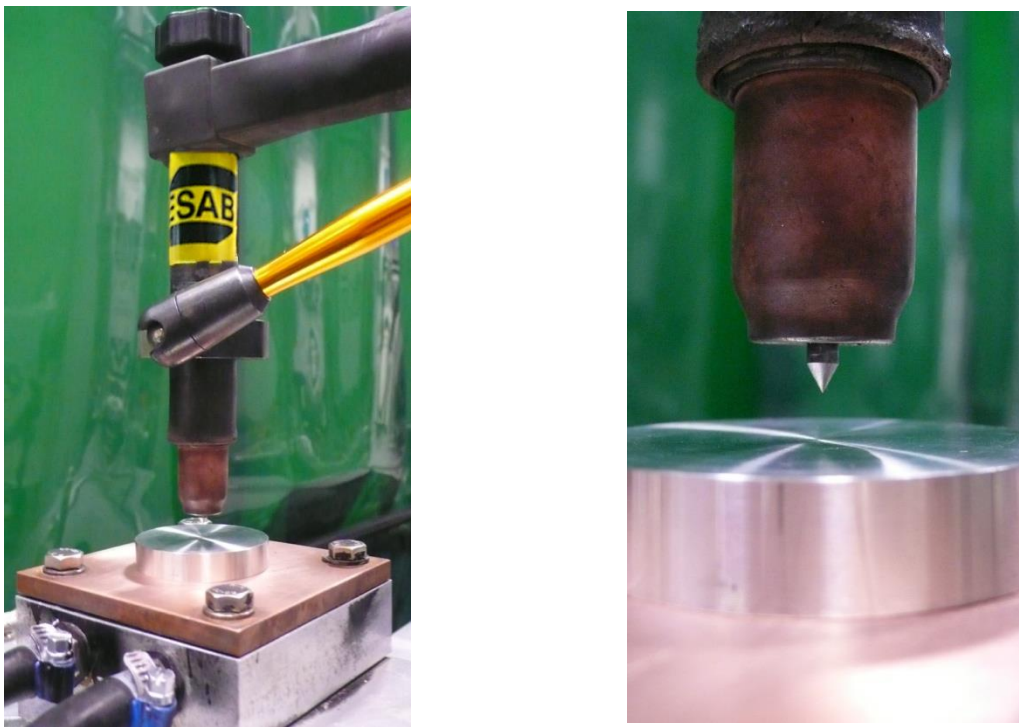
*Figure 0.9 : Schéma en coupe du dispositif d'arc transféré [Mas05]*

Dans cette configuration, la distance inter électrode peut être modifiée grâce à un système de vérins pneumatiques. Cela permet de faire varier la longueur de l'arc selon la configuration souhaitée mais intervient également lors de l'amorçage de l'arc par haute fréquence. En effet, lors de cette étape, la distance inter électrode est abaissée puis étirée jusqu'à atteindre la longueur voulue. La procédure d'amorçage sera décrite un peu plus bas. Enfin la chambre à arc est disposée sur un support comprenant deux moteurs pas à pas situés de part et d'autre du réacteur et permettant de monter et descendre le réacteur verticalement. Ce système est très apprécié lors de mesures spectroscopiques afin de régler la hauteur de visée ou d'effectuer un balayage entier de l'arc.

L'arc électrique est alimenté par un générateur de courant continu pouvant atteindre 400A sous 200V. L'alimentation est reliée à l'arc au travers d'une résistance ballast de quelques dixièmes d'Ohm. Ceci permet de limiter le courant lors de l'amorçage. Pour initier l'arc, plusieurs types d'amorçage sont possibles. L'amorçage par contact consiste à réaliser un pont fondu entre deux électrodes en contact avant de les séparer pour former la décharge électrique. Dans notre configuration, c'est l'amorçage par impulsion haute fréquence qui sera utilisé. Cette impulsion est générée à partir d'une alimentation indépendante. Les électrodes sont rapprochées (au maximum 1mm) et un canal de conduction est créé par un signal haute tension à une fréquence élevée. Une fois l'arc initié par l'impulsion, les vérins pneumatiques sont actionnés pour remonter la cathode et ainsi créer l'arc à la longueur souhaitée, ici 5mm. Le plasma est alors établi. Ce type d'amorçage a l'avantage de limiter la détérioration des électrodes.

### Torche TIG

L'équipe AEPPT est également équipée d'un poste de soudage TIG (*figure 0.10*) mis à disposition par *ESAB Suède* dans le cadre d'une collaboration avec *University West* (Suède).



*Figure 0.10 : Poste de soudage TIG présent au laboratoire*

Ce dernier est composé d'une torche (*torche TIG BTE 250M*) et d'une alimentation pouvant fournir jusqu'à 500A en continu (*Mig U5000i*). La torche délivre le gaz de protection et sert de support à l'électrode réfractaire (cathode). L'arc électrique, de longueur ajustable, est créé entre cette dernière et une pièce métallique (anode). Dans notre étude, un arc électrique d'une longueur de 5mm ou 3mm à 100 ou 150A est généré entre une cathode pointe en tungstène de diamètre 3.2mm et d'angle d'affutage 60° et une anode plane d'épaisseur de 10mm en acier 304. L'atmosphère inerte est assurée par de l'hélium ou de l'Arcal37 (70% hélium-30% argon) à un débit

modulable mais fixé à 10l/min. De la même manière que sur la précédente configuration, la torche et le support d'anode sont montés sur un système de moteur pas à pas pour en permettre le déplacement vertical. Par ailleurs, le déplacement horizontal de la torche n'est pas pris en compte : elle est utilisée en configuration statique (« spot TIG »). La figure ci-dessous présente un schéma global du procédé.

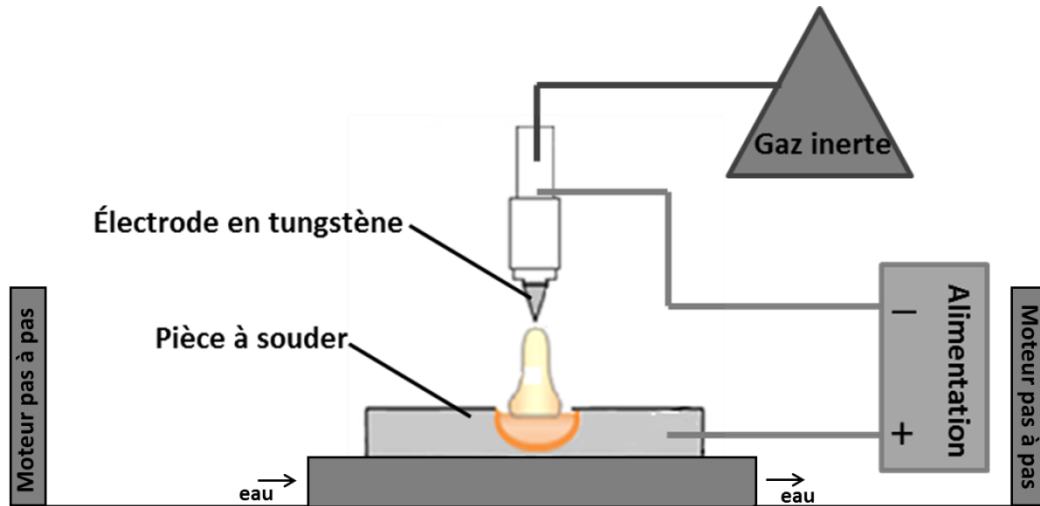


Figure 0.11 : Schéma du dispositif TIG

À ces deux configurations viennent s'ajouter des éléments extérieurs nécessaires aux diagnostics : une caméra rapide, un banc de spectroscopie d'émission et un monochromateur, un système de mesure du courant, de la tension. Ces éléments seront décrits au fur et à mesure des chapitres.

#### IV. Conclusion

Au cours de ce chapitre, l'évolution des techniques de soudage jusqu'à l'apparition des procédés faisant référence aujourd'hui ont été présentés au travers d'un historique. Puis, les spécificités des principaux procédés de soudage ont été détaillées. Une attention particulière a été portée au procédé TIG pour comprendre les enjeux technologiques et industriels actuels auxquels il est confronté. Ceci a permis de montrer le positionnement de ces travaux de thèse dont les objectifs ont ensuite été introduits. Enfin, les dispositifs expérimentaux utilisés dans le cadre de cette étude ont été exposés.

\*\*\*

# CHAPITRE 1 - Étude du plasma





Ce chapitre s'intéresse à l'étude du milieu plasma créé lors de l'interaction d'un arc électrique avec un matériau dans une configuration de soudage TIG. Dans un premier temps, une revue non exhaustive des travaux théoriques autour de la colonne d'arc ainsi que les principales méthodes employées pour la caractériser expérimentalement sont présentées. Dans un second temps, les bases de la spectroscopie d'émission seront présentées ainsi que les différentes méthodes pouvant être employées pour l'analyse de ces données optiques. Dans une troisième partie, le dispositif expérimental mis en place dans le cadre de cette étude sera détaillé. La production de vapeurs métalliques proche de la surface de l'anode sera analysée et les champs de températures obtenus sur notre configuration seront exposés, discutés et comparés aux résultats de la simulation numérique effectuée au sein de notre équipe.

## **I. Les travaux théoriques et expérimentaux**

Dans le procédé TIG, un plasma est créé entre les deux électrodes. La compréhension des mécanismes régissant le procédé passe par l'étude du rayonnement émis par l'arc. Dans le cas présent où un bain métallique se forme pendant l'interaction, l'effet sur le milieu plasma des vapeurs métalliques issues de l'érosion du matériau est un point d'étude important dans la compréhension du processus d'interaction. La première section est consacrée aux travaux théoriques s'intéressant à l'étude de la décharge plasma, mettant ainsi en avant la complexification des modèles numériques au fil du temps. La seconde section s'intéresse aux travaux expérimentaux permettant de caractériser la colonne plasma en dégagant les différentes méthodes de diagnostics pouvant être utilisées.

### **Les travaux théoriques**

La modélisation d'un plasma thermique est basée sur des méthodes de calcul de dynamique des fluides auxquelles s'ajoutent certaines modifications pour prendre en compte le passage du courant et ses conséquences (effet Joule, force de Laplace...) ainsi que les pertes radiatives. Actuellement, les modélisations de plasma thermique pour les applications de soudage sont nombreuses. Les premiers travaux ont porté sur la modélisation de la colonne de l'arc. Les travaux de *KC Hsu et al* [Hsu83] sont souvent cités comme référence dans la littérature. Ces auteurs se sont attachés à décrire le comportement du plasma sur une configuration d'arc libre en évaluant expérimentalement la densité de courant au voisinage de la cathode, grandeur nécessaire pour une description numérique correcte du milieu plasma. Cependant, dans leur modèle, le matériau d'anode n'est pas pris en compte et ne permet donc pas une description complète du processus d'interaction. Par la suite les travaux ont évolué en mettant en place un modèle de cathode [Low92] et d'anode [Zhu95] de manière à décrire la colonne d'arc en s'affranchissant le plus possible des conditions plus ou moins arbitraires utilisées jusqu'alors au niveau des électrodes. Dans le cas où l'anode est peu ou pas refroidie, la plupart des modèles numériques mettent en avant l'importance de la prise en compte des vapeurs métalliques issues de l'érosion de la pièce dans les calculs. La présence de vapeurs entraîne un refroidissement du plasma dans la région contaminée dû à l'augmentation du rayonnement [Gon93][Gon97]. L'abaissement de la température en bord d'arc diminue localement la

conductivité électrique dans le milieu, réduisant ainsi le rayon de conduction. La diminution du rayon de conduction entraîne alors une augmentation de la densité de courant sur l'axe. L'étude de l'influence des vapeurs sur les flux anodiques permet de noter que la présence de vapeurs augmente la densité de courant au niveau de l'anode et donc le flux électrique ; le flux électrique constituant la part essentielle du flux total. En revanche, il diminue sur les bords du plasma puisque le rayon de conduction diminue. Dans cette zone, la présence des vapeurs produit deux effets concurrentiels : en étant directement lié à la présence des vapeurs, le premier augmente la conductivité électrique alors que le second tend à la diminuer du fait de l'augmentation des pertes radiatives [Lag04]. Dans ces modèles, il y a bien un couplage entre le plasma et le matériau mais seulement par la description des échanges thermiques pris en compte à travers les propriétés du matériau. Ces études ont ensuite évolué au sein de la communauté vers des modèles à deux [Tan02] et trois dimensions [Mur11][Mou13-a] incluant une description de l'hydrodynamique au sein du matériau permettant de modéliser la phase liquide. Ces modèles permettent notamment de prédire les dimensions de la zone fondue, l'effet des vapeurs et ce pour les différents paramètres ajustables durant le soudage TIG (nature et débit du gaz, intensité du courant, longueur de l'arc...).

L'effet des vapeurs a été mis en avant en montrant qu'elles entraînaient des modifications sur les caractéristiques du plasma, les transferts d'énergies et de quantité de mouvement vers le métal conduisant à la modification des caractéristiques de la zone fondue. La *figure 1.1* présente le type de résultats obtenus dans les travaux de *J Mougenot et al* [Mou13-b] concernant la modélisation tridimensionnelle d'un arc d'argon de 5mm en interaction avec une anode en acier 304 sous une intensité de 200A après deux secondes d'interaction. La partie en haut à gauche de la figure décrit les températures présentes au sein du milieu plasma et la partie droite la distribution des vitesses dans cette même zone. La température proche de la cathode sur l'axe de la décharge atteint les 20912K et les vitesses sur l'axe sont de l'ordre de  $230\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La partie en bas à gauche présente les températures rencontrées dans la zone liquide, avec, au centre et en surface du bain métallique, une température maximale de 2310K. La partie droite représente la vitesse maximale atteinte dans le bain métallique, de l'ordre de  $30\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  ainsi que les dimensions de la zone fondue en termes de largeur (1.4mm) et de profondeur (9.5mm). Il est également présenté sur cette figure, la distribution du pourcentage de vapeurs métalliques produites qui atteignent les 0.2% massique au centre de la zone d'interaction. Ces travaux ont également montré qu'un changement dans la nature du gaz et/ou dans l'intensité du courant venait modifier la température du milieu et la proportion de fer. Par exemple, le passage d'un plasma d'argon à un plasma d'Arcal37 à puissance équivalente modifie la température du milieu de 20912K à 22579K et la proportion de fer s'élève en terme de fraction massique de 0.2% à 28.5%.

La modélisation des plasmas thermiques a aujourd'hui atteint un point permettant la prédiction d'informations utiles aux applications industrielles et est un moyen efficace pour la compréhension des processus.

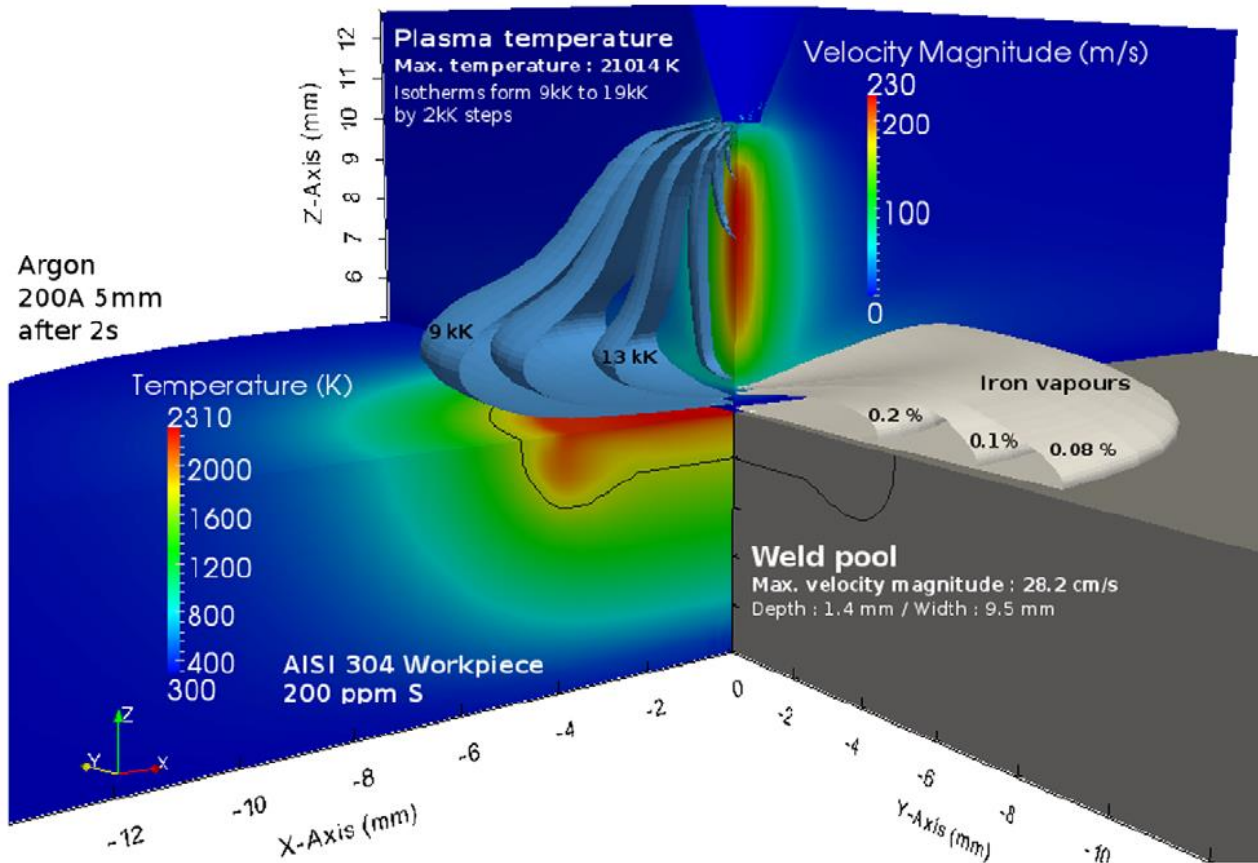
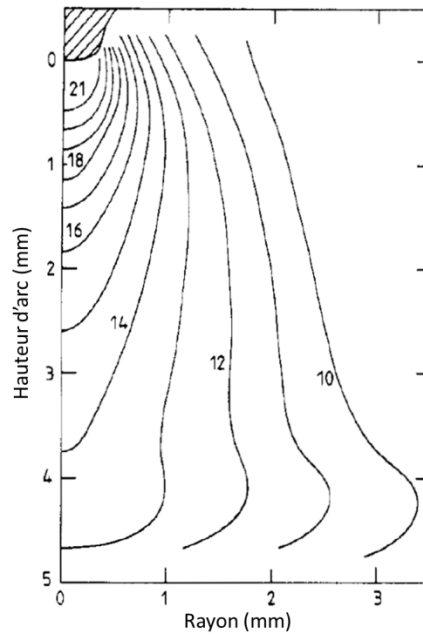


Figure 1.1 : Exemple de résultats pouvant être obtenus par modélisation 3D de l'interaction d'un arc d'argon de 5 mm avec de l'acier 304 sous une intensité de 200A [Mou13-b]

### Les travaux expérimentaux

L'étude expérimentale du plasma thermique impliqué dans le procédé TIG se traduit par la détermination de grandeurs telles que la température, la densité électronique, la vitesse, la composition du plasma ou encore la concentration de vapeurs métalliques pouvant ensemercer le milieu. Différentes méthodes sont employées pour répondre à ces problématiques.

La mesure de la température et de la densité électronique par spectroscopie d'émission est très répandue et de nombreux travaux de la littérature, qui ne pourront pas tous être cités ici, peuvent être trouvés. De même que pour la modélisation, les premières études se sont attachées à décrire le milieu plasma en terme de température et de densité électronique dans une configuration simplifiée tel qu'un arc libre d'argon pur, à pression atmosphérique sous l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local [Ols59][Hsu83][Had84]. La figure 1.2 présente un exemple de résultats pouvant être obtenus par spectroscopie d'émission sur un arc libre [Had84]. Dans cet exemple, les températures estimées pour un arc d'argon de 5mm en interaction avec une anode en cuivre refroidie sous une intensité de 100A sont de l'ordre de 21000K proche de la cathode et diminuent jusqu'à atteindre 13000K proche anode sur l'axe de la décharge. Les températures décroissent en s'éloignant de la décharge et sont de l'ordre de 10000K en périphérie de l'arc, à 3mm de l'axe.



*Figure 1.2 : Profils de températures obtenus par spectroscopie d'émission sur un arc libre d'argon de 5mm en interaction avec une anode en cuivre refroidie sous une intensité de 100A. Les isothermes sont représentées par pas de 1000K [Had84]*

Par la suite, les configurations ont évolué vers des configurations réelles de soudage, donnant lieu à des études notamment sur l'influence des vapeurs sur le plasma. Dans les travaux de *A Farmer et al* [Far86], les profils de température sont déterminés et la concentration en vapeurs métalliques dans l'arc est estimée à partir de raies métalliques du chrome. Cette concentration est évaluée en effectuant le rapport des intensités entre une raie métallique du chrome et une raie d'argon. Leur étude a montré que les vapeurs n'avaient pas une influence significative sur la température de l'arc. Cependant certains auteurs travaillant sur cette problématique ont pu montrer que la présence de vapeurs métalliques avait une influence notable sur les propriétés du plasma : l'augmentation de la conductivité électrique et des pertes radiatives sont la cause du refroidissement du plasma [Raz95]. Ces travaux réalisés jusqu'alors sur du cuivre, ont été poursuivis par l'étude de vapeurs de fer sur une configuration équivalente [Gon97]. Ils ont permis de confirmer les résultats précédents et de valider le modèle numérique associé [Gon93]. Des travaux utilisant une autre méthode de diagnostic [Ter02], la diffusion Thomson, ont confirmé que les vapeurs métalliques avaient une influence significative sur la température de la décharge. La diffusion Thomson permet la mesure de la température en s'affranchissant de l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local. Ces travaux montrent par exemple, qu'il existe une différence de température de 6000K entre un plasma d'hélium de 5mm en interaction avec une anode en acier sous une intensité de 150A avec et sans vapeurs métalliques. Les différences de température trouvées en présence ou absence de vapeurs ne sont pas toujours aussi marquées et sont plutôt de l'ordre de 1000K à 2000K [Raz95][Ete85] mais les études présentes dans la littérature possèdent des conditions expérimentales très variées (intensité du courant, nature du gaz ou du matériau d'anode, longueur de l'arc). Certains auteurs restent néanmoins prudents quant à l'utilisation de la méthode de diffusion Thomson, indiquant qu'elle pourrait influencer le paramètre mesuré en obtenant des températures différentes

selon l'angle de déviation utilisé [Gre99][Sny94]. Certains auteurs s'intéressent également à la mise en place de méthodes innovantes par rapport aux méthodes classiques de spectroscopie d'émission. Dans leurs travaux, *B Bachmann et al.* [Bac13] utilisent l'imagerie rapide pour la détermination de la température du milieu plasma. Sur la matrice de la caméra, deux images provenant de l'arc sont recueillies : la lumière émise par l'arc passe au travers d'un cube réflecteur séparant la lumière en deux chemins optiques et permettant à chacun de passer au travers de deux filtres interférentiels différents. En repassant par le cube réflecteur sur le chemin retour, les deux trajets filtrés sont amenés sur la matrice de la caméra. La température est ensuite déterminée à partir du rapport des émissivités obtenues pour les deux intervalles spectraux en chaque point de la matrice (*figure 1.3(a)*). Les profils de température associés à cette méthode ont été comparés à différentes méthodes utilisées en spectroscopie d'émission (rapport d'intensité des raies, méthode de l'intensité absolue, méthode de Fowler-Milne, utilisation de l'élargissement Stark). Les résultats présentés sur la *figure 1.3(b)* suggèrent un bon accord entre les profils de température obtenus par la méthode basée sur l'imagerie rapide et les méthodes « classiques » de spectroscopie d'émission.

D'autres méthodes existent pour le diagnostic de la colonne d'arc [Vac00] mais les travaux utilisant ces méthodes ne seront pas détaillés ici :

- *la spectroscopie optique d'absorption* : cette méthode est basée sur l'absorption par le milieu ionisé de photons émis par une source extérieure. De la même manière qu'en spectroscopie d'émission, les grandeurs à mesurer peuvent être obtenues en utilisant le continuum ou les profils de raies. Les mesures d'absorption nécessitent cependant des sources de lumière suffisamment intenses afin que le rayonnement émis par le plasma ne gêne pas la détection.
- *la technique du CARS* (Coherent Anti Stokes Raman Spectroscopy) basée sur la diffusion laser : tout comme la diffusion Thomson, elle a l'avantage de s'affranchir des hypothèses sur l'état d'équilibre du plasma, d'avoir une bonne résolution spatiale et dans le cas de l'utilisation d'un laser pulsé une bonne résolution temporelle. Cependant sa mise en œuvre est coûteuse et l'interprétation des données nécessite l'utilisation et le développement de modèles complexes.
- *les mesures basées sur l'indice de réfraction du plasma* : ce sont des méthodes fondées sur la propagation des ondes électromagnétiques et utilisant les propriétés de l'indice de réfraction du milieu pour ces ondes [Lan11]. Parmi elles se trouvent les techniques interférométriques utilisant des interféromètres à deux ondes du type Mach-Zender ou Michelson pour mesurer la densité électronique et la densité des atomes neutres sur l'axe d'une colonne d'arc ou la température du milieu [Rab04] [Kaf79] ou l'interféromètre de *DE Ashby* et *DF Jephcott* pour suivre l'évolution de la densité électronique dans le plasma [Ash65]. S'ajoutent à ces techniques, l'ombroscopie et la strioscopie qui s'intéressent respectivement à l'intensité lumineuse et à l'angle de

déflexion des rayons lumineux ayant traversé un milieu contenant un gradient d'indice, déviation qui permet de déduire la température plasma.

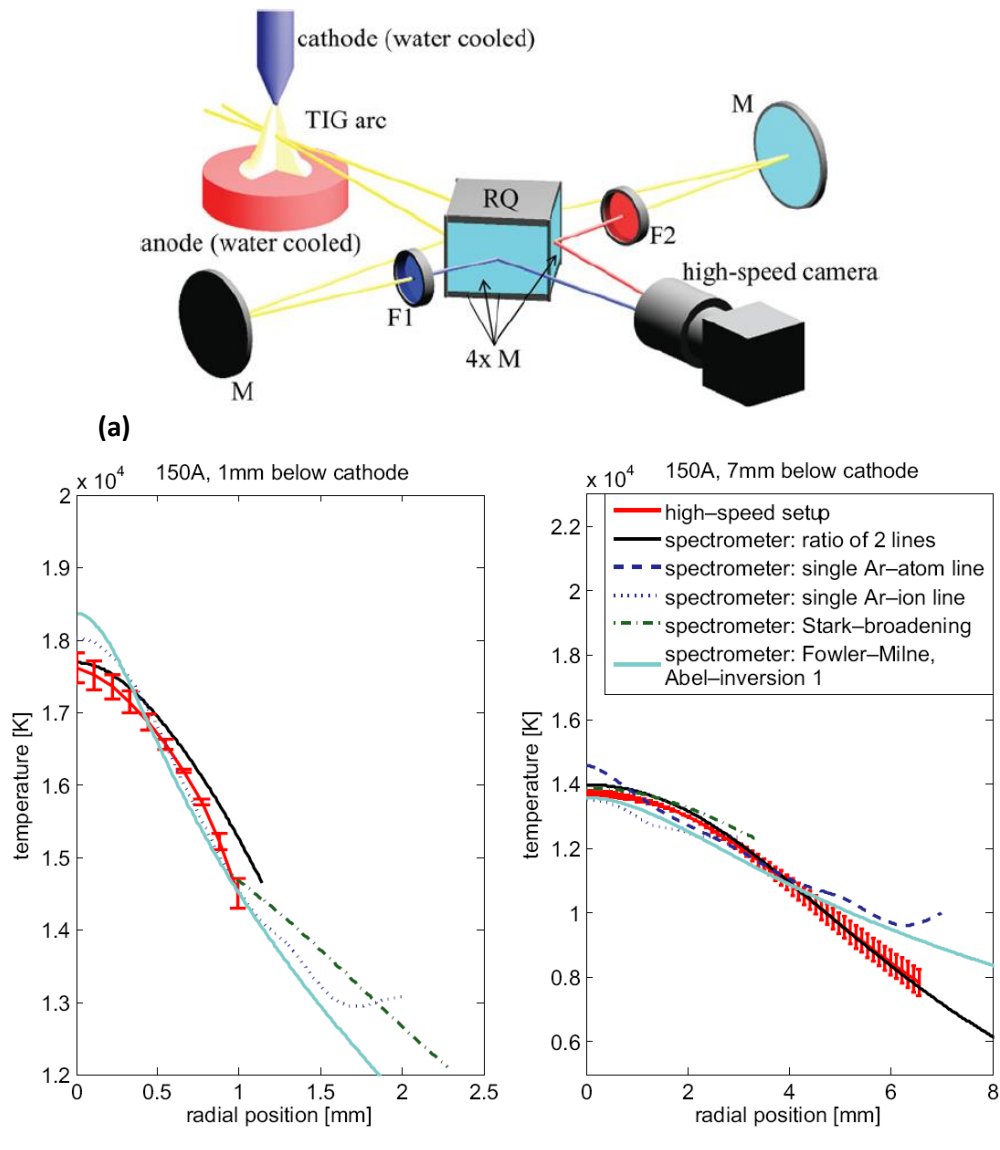


Figure 1.3 : (a) Dispositif expérimental mis en œuvre pour la détermination des profils de température par imagerie rapide (b) comparaison des profils de température obtenus à 1 et 7mm sous la cathode par la nouvelle méthode mise en œuvre et les méthodes classique de spectroscopie d'émission [Bac.13].

Dans ces travaux de thèse, la spectroscopie d'émission pour l'analyse de la colonne d'arc a été choisie. Les bases de cette technique et les méthodes pouvant être utilisées pour le calcul de température et densité électronique à partir des données recueillies sont maintenant présentées.

## II. Spectroscopie d'émission

Un plasma thermique est le siège de phénomènes collisionnels entraînant l'émission d'un rayonnement issu des différentes transitions électroniques. Le rayonnement émis contient des propriétés caractéristiques du plasma. La spectroscopie d'émission est une technique permettant

d'exploiter le spectre de la lumière émise par l'arc électrique et peut donc être utilisée pour en déduire les paramètres d'intérêt (température, densité électronique).

L'émission du rayonnement d'un plasma est la conséquence de différentes transitions électroniques dues aux collisions dans le milieu. Deux types de transitions sont distinguées : les transitions continues et discrètes. Selon l'état de l'électron mis en jeu, les transitions continues peuvent être de type libre-libre ou libre-lié donnant naissance à un spectre continu (continuum). Les transitions discrètes, elles, ne mettent en jeu que des électrons d'état liés conduisant à un spectre de raies. Le rayonnement total du plasma correspond à la superposition des deux types de spectres.

### **Spectre continu ou continuum**

Deux phénomènes sont à l'origine de l'émission du spectre continu : le rayonnement de freinage, résultat des transitions libre-libre ; et la recombinaison radiative, conséquence des transitions libre-lié.

Le rayonnement de freinage se produit lors de l'interaction entre un électron et un ion ou un électron et un atome. Lorsqu'un électron libre entre dans le champ de potentiel électrostatique d'un ion chargé positivement ou d'un atome, celui-ci se trouve ralenti. Il y a alors émission d'un photon dont l'énergie correspond à la perte d'énergie cinétique de l'électron libre. Dans le cas de la recombinaison radiative, l'électron libre est capturé par un ion chargé positivement et l'ensemble se recombine pour former un ion ou un atome excité. L'excédent d'énergie de l'électron est libéré sous forme d'un continuum. Le photon émis possède une énergie égale à la différence d'énergie d'ionisation entre l'ion initial et l'ion final.

Le fond continu total est la superposition de ces deux spectres émis par chacun des processus.

### **Spectre de raies**

Ce sont les transitions radiatives des électrons liés à l'atome entre deux niveaux d'énergie dits « haut »  $E_h$  et « bas »  $E_b$  qui sont à l'origine du spectre de raies. Lors de ces transitions, un photon de fréquence  $\nu$  bien déterminée est émis :

$$\nu = \frac{E_h - E_b}{h} \quad (II.1)$$

où  $h$  est la constante de Planck.

L'intensité d'une raie peut être reliée au peuplement des différents niveaux impliqués dans la transition par la relation d'Einstein :

$$\varepsilon_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \cdot A_{hb} \cdot n_h \quad (II.2)$$

où  $A_{hb}$  représente la probabilité de transition entre les niveaux haut et bas et  $n_h$  la densité électronique du niveau émetteur.

Cette grandeur représente l'énergie rayonnée par la raie pour un volume unité de plasma contenant  $n_h$  atomes dans l'état  $E_h$  se désexcitant spontanément vers le niveau  $E_b$ , par unité



d'angle solide et de temps. Cette puissance rayonnée s'exprime en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$  (SI) ou en  $\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$  (CGS) et est communément appelée émissivité ou coefficient d'émission.

### **Équilibre thermodynamique**

La composition d'un plasma thermique est un paramètre essentiel évoluant en fonction de la température. Pour déterminer la composition d'un plasma thermique, certaines lois dites « lois de l'équilibre thermodynamique » sont nécessaires. Ceci passe par le calcul des densités de chaque espèce présente au sein du milieu en fonction de la température et de la pression. Une fois la composition définie, il est possible d'estimer les grandeurs thermodynamiques du plasma et de son rayonnement.

Pour que l'équilibre thermodynamique total soit établi dans un milieu, ce dernier doit répondre à certaines conditions. Tout d'abord, aucun gradient de température ou de concentration de particules ne doit être présent dans le milieu. À cela vient s'ajouter une condition de micro réversibilité des processus se produisant au sein du milieu. De cette manière, il y a établissement d'un équilibre entre les phénomènes. Un tel milieu est régi par un ensemble de lois. Les processus collisionnels sont décrits par les lois de Maxwell, de Boltzmann, de Saha et de Guldberg-Waage et le rayonnement par la loi de Planck. A ces lois générales, viennent s'ajouter, dans le cas des plasmas thermiques, deux lois annexes qui ne sont pas uniquement caractéristiques de l'équilibre thermodynamique : la loi de neutralité électrique et la loi de Dalton.

Dans le cas particulier des plasmas thermiques, le milieu présente d'importants gradients de température et de densité. La température sur l'axe de la décharge est plus élevée qu'en périphérie du plasma et un rayonnement est émis en dehors du milieu. Le rayonnement d'un plasma ne peut alors pas être considéré comme le rayonnement d'un corps noir car toutes les radiations émises ne sont pas réabsorbées par le milieu : la loi de Planck ne peut y être vérifiée. Pour toutes ces raisons, l'équilibre thermodynamique total ne peut pas être considéré au sein d'un plasma d'arc. Cependant, il est possible de définir des conditions d'application de certaines lois de l'équilibre thermodynamique total afin de déterminer la composition et les propriétés du plasma. Un nouvel état dit équilibre thermodynamique local (ETL) est alors défini. En considérant le plasma comme un ensemble de sous-systèmes ayant chacun une température uniforme, les lois régissant les processus collisionnels (Maxwell, Boltzmann, Saha, Guldberg-Waage) sont alors valables et applicables localement. Par ailleurs, l'absence de la condition de micro réversibilité des processus radiatifs interdit l'application de la loi de Planck même localement. En effet, le rayonnement du plasma dépend des différentes régions traversées où règnent des gradients de température.

Outre une absence de forts gradients de température et de densité, les processus radiatifs devront être négligeables devant les processus collisionnels pour pouvoir considérer le milieu à l'équilibre thermodynamique local.

Comme énoncé plus haut, le spectre de raies est caractéristique des espèces présentes dans le milieu. L'étude de l'intensité des raies permet la détermination de la température du plasma à condition que l'équilibre thermodynamique local soit établi et que les raies considérées ne soient pas

auto absorbées. À l'équilibre thermodynamique, la loi de Boltzmann régissant les populations  $n_h$  des différents niveaux d'énergie permet d'écrire le coefficient d'émission théorique (équation (II.2)) sous la forme :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{hc}{4\pi \cdot \lambda} A_{hb} \cdot g_h \frac{N(T)}{Q(T)} e^{-E_h/k_B T} \quad (II.3)$$

où  $g_h$  est la dégénérescence du niveau émetteur,  $N(T)$  est la densité totale de l'espèce considérée et  $Q(T)$  la fonction de partition.

L'intensité de la raie est donc reliée à la température au travers de cette expression. L'émissivité passe par un maximum pour une température particulière dite température d'émission maximale  $T_m$ . Au-delà, l'émissivité décroît quand la température augmente. Cette température d'émission maximale dépend de la pression et de la composition du plasma. Pour une composition donnée, si la pression diminue alors la température  $T_m$  diminue et le maximum de l'émissivité se décale vers les basses températures. À titre d'exemple, l'émissivité de la raie d'argon neutre située à 696.54nm dans un plasma d'argon pur à la pression atmosphérique en fonction de la température a été tracée (figure 1.4). L'émissivité maximale est atteinte aux alentours de 15200K.

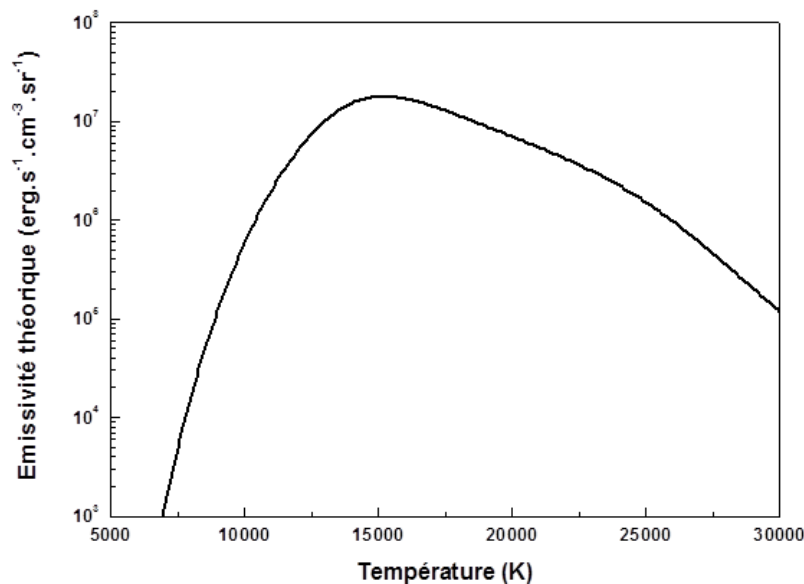


Figure 1.4 : Émissivité de la raie 696.54nm dans un plasma d'argon pur en fonction de la température

Différentes méthodes existent pour déterminer la température à partir de la mesure de l'énergie d'une raie.

Dans la plupart des méthodes de diagnostic qui sont décrites ci-après, il est nécessaire d'appliquer une méthode permettant de remonter aux émissivités locales à partir du signal enregistré appelée inversion d'Abel. Les signaux acquis lors des mesures proviennent d'une section horizontale de plasma. Les valeurs locales des émissivités ne peuvent être obtenues directement. Le signal obtenu est en réalité la somme de toutes les valeurs locales le long de la corde correspondant à la section de plasma considérée. Il correspond à une intensité intégrée  $I$ . Le passage du profil

intégré  $I$  au profil d'émissivité est réalisé, en faisant l'hypothèse que le plasma possède un axe de symétrie, par une opération mathématique appelée inversion d'Abel. Cette dernière permet donc de calculer la distribution radiale du coefficient d'émission à partir de la distribution de l'intensité. À partir du calcul de l'émissivité locale  $\varepsilon(r)$ , le profil de température peut être déduit. Il existe différentes méthodes numériques permettant la résolution de cette inversion. Parmi elles se trouvent la méthode de *SM Jaffe* [Jaf91] et la méthode de *JF Mermet* et *JP Robin* [Mer73]. Le formalisme mathématique de l'inversion d'Abel ainsi que la résolution par ces méthodes numériques ne seront pas décrits ici. Elles sont détaillées dans de nombreux travaux [Fre02] [Mas05].

### **Méthode de l'intensité absolue**

La raie utilisée expérimentalement permet d'obtenir le profil d'émissivité en fonction du rayon  $\varepsilon(r)$  à l'aide d'une inversion d'Abel. Par ailleurs, le calcul de la composition du plasma à pression atmosphérique donne l'émissivité théorique en fonction de la température  $\varepsilon_{th}(T)$ . L'égalité entre ces deux grandeurs permet de déduire le profil de température en fonction du rayon  $T(r)$ .

### **Méthode de Fowler-Milne**

Le coefficient d'émissivité théorique  $\varepsilon_{th}(T)$  passe par un maximum pour une température dite température d'émission maximale notée  $T_m$ . Ce maximum et la température d'émission associée peuvent être modifiés selon la composition et la pression du milieu. Dans le cas d'un plasma cylindrique où la température sur l'axe  $T_0$  est supérieure à  $T_m$ , le coefficient d'émissivité obtenu expérimentalement  $\varepsilon_{exp}(r)$  présente un maximum d'émission en dehors de l'axe à une distance radiale  $r_m$ . En ce point, la température vaut  $T_m$ . Dans ce cas, il est possible de déterminer la distribution radiale de température du plasma. A l'équilibre thermodynamique local, l'égalité suivante est obtenue :

$$\frac{\varepsilon_{exp}(r)}{\varepsilon_{exp}(r_m)} = \frac{\varepsilon_{th}(T)}{\varepsilon_{th}(T_m)} \quad (II.4)$$

où  $\varepsilon_{exp}(r_m)$  représente le maximum d'émission sur le rayon  $r = r_m$ .

À partir de cette égalité, le profil d'émissivité en fonction du rayon peut être connu et permettra de déduire le profil de température en fonction du rayon  $T(r)$ .

Cette méthode a l'avantage de s'affranchir d'un étalonnage. Cependant, cette méthode peut s'avérer peu précise, notamment lorsque le maximum d'émissivité est peu marqué.

### **Diagramme de Boltzmann**

L'équation (II.3) peut se mettre sous la forme suivante :

$$\ln\left(\frac{\varepsilon_\lambda \cdot \lambda}{A_{hb} \cdot g_{hb}}\right) = -\frac{E_h}{k_B T} + \ln\left(\frac{h \cdot c \cdot N(T)}{4\pi \cdot Q(T)}\right) \quad (II.5)$$

Le dernier terme ne dépend que de la température du point du plasma considéré. Si plusieurs raies sont utilisées, un diagramme représentant les variations du premier terme de

l'équation (II.5) en fonction de l'énergie  $E_h$ , peut être tracé. Une droite de pente  $-\frac{1}{k_B T}$  est alors obtenue. Il est alors possible de déterminer la température à partir de la pente de cette droite. De plus, la répartition des points sur le diagramme donne une indication sur les éventuels écarts à l'équilibre thermodynamique local du milieu.

Cette méthode est un bon moyen de s'affranchir d'un étalonnage et de la densité des états. Cependant, il est nécessaire de sélectionner des raies ayant des niveaux émetteurs suffisamment éloignés en énergie, de l'ordre de 1eV, mais dans la même gamme de longueurs d'ondes. Plus le nombre de raies sera élevé et les niveaux émetteurs éloignés, plus la pente de la droite obtenue sera précise.

La méthode dite « rapport d'intensité de deux raies » est l'équivalent d'un diagramme de Boltzmann à deux points. Elle peut par exemple être appliquée entre une raie neutre et ionique d'une même espèce.

### **Méthode basée sur l'étude du profil de raie**

Les forces d'interaction entre particules et l'agitation thermique dans le plasma provoquent des élargissements des raies spectrales et modifient leurs profils. L'analyse du profil des raies permet de remonter aux grandeurs qui en sont à l'origine. Plusieurs processus d'élargissement sont distingués. Ces types d'élargissement sont présentés ci-dessous mais leur formalisme ne sera pas détaillé. Des précisions peuvent être trouvées dans la littérature [Vac00][Fre02].

- *l'élargissement naturel* : le niveau de l'atome émetteur possède une certaine durée de vie. L'élargissement naturel est la conséquence de la distribution de l'émission des électrons autour du temps moyen de durée de vie. Cette dispersion reste néanmoins très faible ( $10^{-4}\text{Å}$ ) et est négligeable devant les autres causes d'élargissement.
- *l'élargissement Doppler* : il est créé par le mouvement des atomes émetteurs par rapport à l'observateur supposé immobile. Pour une raie dont la répartition serait une fonction de Dirac centrée sur  $\lambda_0$ , l'élargissement Doppler conduit à une distribution de type gaussienne. Cet élargissement permet de mesurer la température des atomes émetteurs (particules lourdes) qui dans certains cas, se confond avec la température électronique. Cependant, l'élargissement Doppler reste assez faible pour la plupart des plasmas de laboratoire et difficilement discernable si, à cela, se superposent les autres causes d'élargissement.
- *l'élargissement collisionnel* : il est dû aux interactions entre l'atome émetteur et les autres particules qui l'entourent. L'interaction avec des particules neutres donne naissance à des effets du type Van der Waals et Stark dans le cas des particules chargées. Une distinction est faite dans le calcul des élargissements selon qu'il s'agit d'interactions avec des particules légères (électrons) ou lourdes (ions). Dans tous les cas, les profils engendrés sont de type Lorentzien.
- *l'élargissement dû à l'instrument de mesure* : les spectromètres utilisés expérimentalement produisent un élargissement de type gaussien du spectre d'émission qui en théorie est un pic de Dirac pour une transition parfaitement monochromatique. Cet élargissement

« expérimental » est appelé fonction d'appareil du spectromètre. Son profil peut être déterminé en utilisant une source lumineuse produisant des raies de très faibles largeurs spectrales telle qu'une lampe à vapeur métallique basse pression. Ainsi la mesure de la largeur à mi-hauteur de la raie est environ égale à la largeur de la fonction d'appareil du monochromateur. Pour une ouverture de fentes et une longueur d'onde donnée, le profil d'une raie est enregistré et la largeur totale à mi-hauteur de ce profil est mesurée.

Quand l'effet Stark prédomine, ce qui est généralement le cas pour les arcs électriques, l'élargissement observé dépend essentiellement de la densité électronique et très peu de la température. La largeur des raies observées permet alors d'obtenir directement la densité électronique, quelle que soit sa température ou sa composition chimique.

Une méthode basée sur l'élargissement des profils de raies permet de déterminer simultanément la densité électronique et la température [Tor03]. La dépendance de l'élargissement Stark en fonction de la densité électronique et de la température pour deux raies donne lieu à un système de deux équations où les deux inconnues sont la température et la densité électronique. Le formalisme de cette méthode est détaillé dans les travaux de thèse de Valensi [Val07]. Dans ses travaux, la méthode est appliquée à une configuration de soudage MIG-MAG au sein de laquelle la forte proportion de fer dans le milieu exclut l'utilisation de la méthode de Fowler-Milne. Cette méthode nécessite de connaître la dépendance de l'élargissement Stark en fonction de la température. Les données pour la raie d'argon 696.54nm et du fer 538.34nm ont été mesurées expérimentalement et peuvent être trouvées dans la littérature [Pel96][Les90]. Les raies spectrales doivent donc faire l'objet d'une étude attentive avant d'être utilisées.

### **III. Mise en œuvre expérimentale**

#### **1. Présentation du dispositif optique**

La détermination des champs de température de la décharge nécessite de collecter le rayonnement issu du milieu plasma. Pour cela, un dispositif optique permet de récupérer la lumière émise par le plasma et de l'amener jusque sur la fente d'entrée du monochromateur. Le monochromateur utilisé est un spectromètre ACTON SP2758i de focale 750mm et équipé d'une tourelle de trois réseaux interchangeables (300, 1200 et 2400 traits par millimètre) pouvant couvrir une gamme spectrale allant de 200 à 900nm. Le réseau essentiellement utilisé pour les mesures spectroscopiques est le réseau à 1200 traits par millimètre. Il comprend des fentes d'entrée et de sortie qui sont dans des plans conjugués l'un de l'autre au moyen d'un système optique constitué de deux miroirs toroïdaux et d'un réseau plan. Le système dispersif (réseaux) peut tourner de manière à orienter une longueur d'onde donnée vers la fente de sortie. Les fentes du monochromateur mesurent 14mm de hauteur et ont une amplitude d'ouverture allant de 10 $\mu$ m à 3mm. Ce spectromètre a la particularité d'être un imageur.

En sortie du monochromateur, une matrice de photodiodes récupère le signal lumineux et le convertit en signal électrique. Ce détecteur est une matrice CCD PIXIS-1024F de chez Roper Scientific

(Princeton Instruments). Sa cellule photosensible de type 'Front Illuminated' est une matrice composée de pixels carrés de  $13\mu\text{m}$ . Elle comporte 1024 lignes et 1024 colonnes. La matrice a une capacité de réponse sur une large plage de longueur d'onde (400 à 1080nm), cependant son efficacité est maximale autour de 600nm. Cette matrice est reliée à un ordinateur par lequel les acquisitions sont réalisées. Le dispositif général est présenté sur la figure ci-dessous :

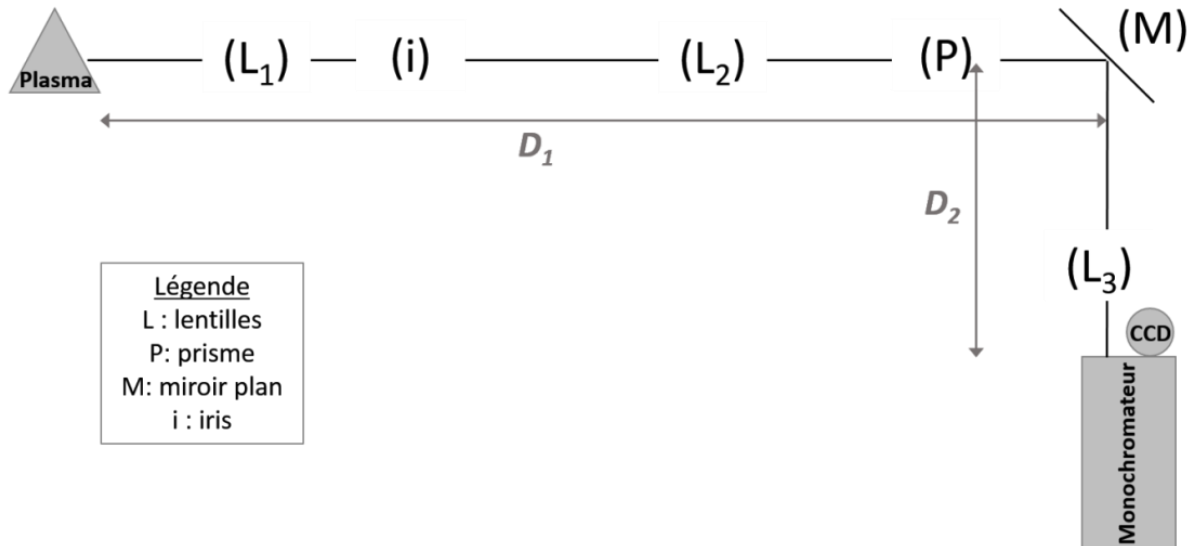


Figure 1.5 : Schéma de la chaîne d'acquisition pour la mise en œuvre des mesures spectroscopiques

Le système optique est constitué de trois lentilles ( $L_1, L_2, L_3$ ), un miroir plan (M), un prisme (P) et un iris (i). L'obtention d'un champ de température total de la décharge, c'est-à-dire une valeur de température pour chaque couple de point  $(r, z)$ , nécessite l'acquisition sur toute la hauteur de l'arc (suivant l'axe  $z$ ) et sur le diamètre de l'arc (suivant l'axe  $r$ ). Le balayage en hauteur de l'arc est effectué à l'aide des moteurs pas à pas installés sur la torche. Ce n'est donc pas le système optique qui se déplace mais le plasma lui-même. Pour éviter d'avoir à balayer l'arc radialement, un Dove prisme a été ajouté au système optique de manière à renverser l'image de l'arc et à obtenir sur les fentes d'entrées du monochromateur la totalité de la section plasma (figure 1.6).

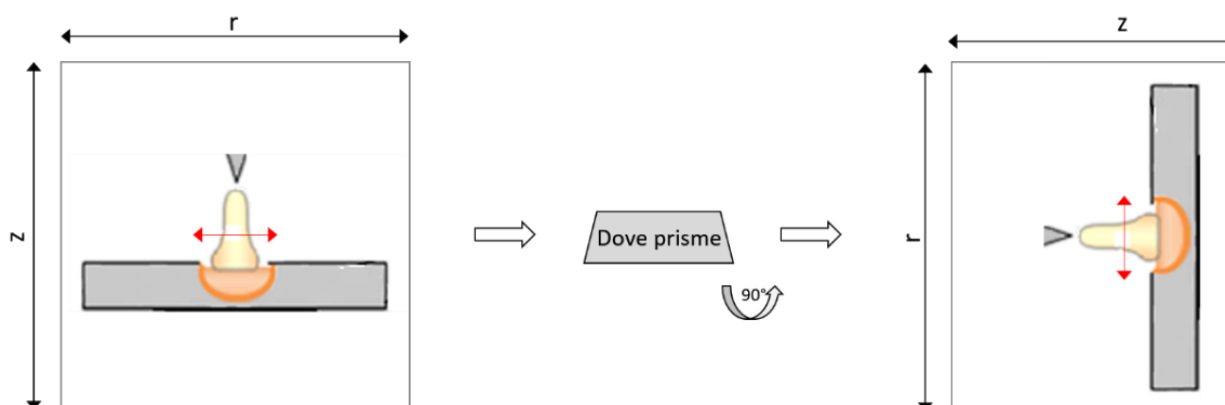


Figure 1.6 : Schéma du système de renversement d'image

Les caractéristiques des lentilles et leur disposition sur le banc optique ont été déterminées en prenant en compte différents types de contraintes :

- le grandissement total du dispositif est déterminé par la hauteur des fentes d'entrées du monochromateur qui doit recevoir la totalité de la section du plasma,
- la longueur totale du trajet optique est conditionnée par la disposition de la salle d'expérimentation,
- le choix des focales et des diamètres des lentilles est dépendant de l'offre disponible chez les fournisseurs.

Le grandissement total du système optique est défini comme le rapport entre la taille de l'image  $\overline{A'B'}$  sur la taille de l'objet  $\overline{AB}$ . La taille maximale de l'image pouvant être obtenue sur cette configuration correspond à la hauteur des fentes soit 14mm. Par mesure de sécurité, la taille maximale de l'image est fixée à 10mm. L'objet quant à lui correspond à l'étalement radial maximal de l'arc  $R_{arc}$ . En général, l'étalement de l'arc est défini comme le rayon correspondant à l'isotherme 10000K qui équivaut au rayon d'accroche de l'arc. Il est de l'ordre de 10mm dans les cas classiques (arc de 5mm dans l'argon à un débit de 10l/min sous une intensité de 200A). L'étalement radial maximal a été choisi à 30mm. Il est largement surestimé pour s'assurer d'obtenir la totalité de la section plasma quelles que soient les conditions opératoires (nature du gaz ou intensité du courant pouvant par exemple influencer sur la forme d'arc) sur toute la hauteur des fentes et ne pas perdre une partie du signal. Le grandissement maximal ( $\gamma_{max}$ ) envisagé est donc de 0.3.

$$\gamma_{max} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{h_{fentes}}{R_{arc}} = \frac{10}{30} = 0.33 \sim 0.3 \quad (II.6)$$

Le choix des focales des lentilles et de leur position sur l'axe optique dépend tout d'abord du trajet optique total qui ne doit pas être trop élevé pour faciliter la mise en œuvre expérimentale du système. Le schéma du dispositif présenté sur la *figure 1.5* indique que le trajet optique est divisé en deux parties : un premier chemin ( $D_1$ ) allant de la torche au miroir plan (M), un second ( $D_2$ ) allant du miroir (M) au monochromateur. Le trajet  $D_2$  est fixe et mesure 120cm. Le trajet  $D_1$  est ajustable jusqu'à une valeur maximale de 240cm.

La *figure 1.7* présente le schéma optique du système. Le schéma présenté n'inclut pas le prisme et le miroir plan. Ces éléments n'ont aucune influence sur les caractéristiques des rayons lumineux et n'ont pour effet que de les dévier.

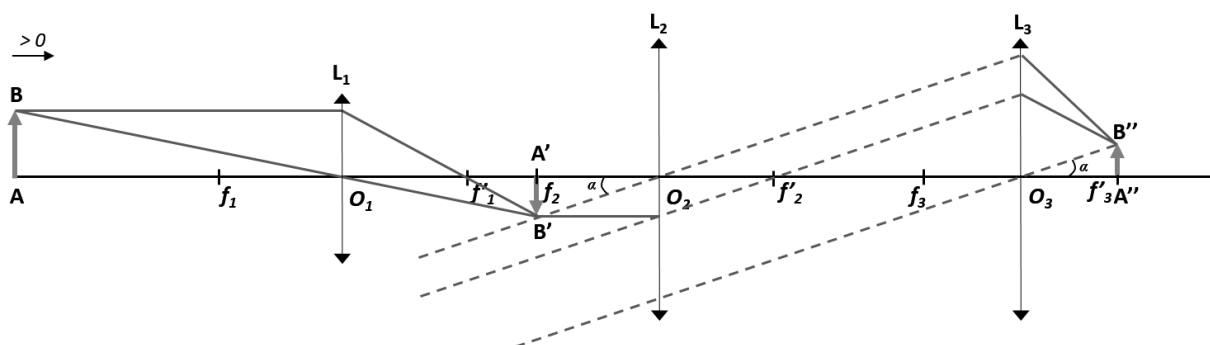


Figure 1.7 : Schéma optique du système mis en place

L'image de l'arc formée par la lentille  $L_1$  est envoyée dans le plan focal de la lentille  $L_2$ . L'image virtuelle formée à l'infini au travers de la lentille  $L_2$  joue ensuite le rôle d'objet pour la lentille

$L_3$ . L'image est alors créée dans le plan focal de cette dernière, plan focal qui coïncide avec la fente d'entrée du monochromateur. Le système optique est constitué de trois lentilles dont le grandissement total peut s'écrire :

$$\gamma_{total} = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 = \frac{\overline{A''B''}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A''B''}}{\overline{A'B'}} \cdot \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \quad (II.7)$$

Le rapport  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$  correspond au grandissement transversal  $\gamma_1$  et le rapport  $\frac{\overline{A''B''}}{\overline{A'B'}}$  au grandissement du système  $\{L_2, L_3\}$  noté  $G_t$ . Les lois de la géométrie permettent de montrer que les angles  $(O_2A'-O_2B')$  et  $(O_3A''-O_3B'')$  sont égaux à  $\alpha$ . L'égalité suivante est alors rencontrée :

$$\tan \alpha = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{O_2A'}} = \frac{\overline{A''B''}}{\overline{O_3A''}} = -\frac{\overline{A'B'}}{\overline{O_2F_2}} = \frac{\overline{A''B''}}{\overline{O_3F_3}} \quad (II.8)$$

D'où

$$G_t = \frac{\overline{A''B''}}{\overline{A'B'}} = -\frac{\overline{O_3F_3}}{\overline{O_2F_2}} \quad (II.9)$$

Soit,

$$\gamma_{total} = \gamma_1 G_t = -\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \cdot \frac{\overline{O_3F_3}}{\overline{O_2F_2}} \quad (II.10)$$

La focale et le diamètre de la lentille  $L_3$  ( $f_3=15\text{cm}$  et  $d_3=7.62\text{cm}$ ) ont été imposés par un précédent montage utilisant la partie  $D_2$  représentée sur la *figure 1.5*. La focale de la lentille  $L_1$  a été déterminée à partir du grandissement souhaité et des focales disponibles chez les fournisseurs. Le choix de cette focale a été fait en prenant en compte des considérations matérielles (encombrement de la torche ou des supports de lentilles, dimension de la table optique...). L'iris étant placé dans le plan focal image de la première lentille, la distance entre l'image et le centre optique de la lentille  $\overline{O_1A'}$  doit être suffisamment grande pour que les supports respectifs ne gênent pas et de façon à ne pas trop augmenter le trajet optique. La relation de conjugaison permet d'exprimer la distance  $\overline{O_1A'}$  en fonction du grandissement et de la focale de la lentille  $L_1$  :

$$\frac{1}{\overline{O_1F_1}} = \frac{1}{\overline{O_1A'}} - \frac{1}{\overline{O_1A}} \quad (II.11)$$

$$\overline{O_1A'} = \overline{O_1F_1}(1 - \gamma_1) \quad (II.12)$$

Une fois le grandissement  $\gamma_1$  déterminé, le grandissement  $G_t$  du système  $\{L_2, L_3\}$  peut être connu :



$$G_t = \frac{\gamma_{tot}}{\gamma_1} \quad (II.13)$$

La focale  $f_3$  étant imposée, la focale  $f_2$  est évaluée :

$$\overline{O_2F_2} = -\frac{\overline{O_3F_3}}{G_t} \quad (II.14)$$

Les diamètres des trois lentilles ont été choisis en fonction des supports déjà existants en salle d'expérimentation.

Une fois ces paramètres déterminés, la position des lentilles sur l'axe optique a pu être définie. La distance  $\overline{O_1A_1}$  étant connue ainsi que le grandissement  $\gamma_1$ , la distance séparant l'arc de la première lentille a été calculée :

$$\overline{O_1A} = \frac{\overline{O_1A_1}}{\gamma_1} \quad (II.15)$$

Le plan focal objet de la lentille  $L_2$  doit être placé à l'endroit où se forme l'image issue de la lentille  $L_1$  soit à la distance  $\overline{O_2A}$  de l'arc :

$$\overline{O_2A} = \overline{O_1A_1} + \overline{O_2F_2} \quad (II.16)$$

Le plan focal image de la lentille  $L_3$  doit coïncider avec les fentes d'entrées du monochromateur soit :

$$\overline{O_3A} = D_1 + (D_2 - \overline{O_3F_3}) \quad (II.17)$$

Une première configuration a été validée avec le grandissement évoqué plus haut ( $\gamma_{total} = 0.3$ ). Cependant, la mise en place du dove prisme, d'une hauteur de 15.2mm, comme système de renversement d'image a nécessité de modifier le grandissement  $\gamma_1$  pour éviter de tronquer une partie de l'image.

Le nouveau grandissement  $\gamma_{total}$  a été choisi à 0.15 permettant d'obtenir les caractéristiques suivantes :

- une lentille biconvexe ( $L_1$ ) de focale 25cm et de diamètre 5cm placée à 120cm de l'arc formant une image  $A'B'$  à 32cm de son centre optique,
- une lentille plan convexe ( $L_2$ ) de focale 25cm et de diamètre 7.6cm placée à 177cm de l'arc formant une image à l'infini,
- une lentille plan convexe ( $L_3$ ) de focale 15cm et de diamètre 7.6cm placée à 345cm de l'arc formant une image  $A''B''$  dans son plan focal image sur les fentes d'entrées du monochromateur.

La figure 1.8 présente un schéma du positionnement des lentilles sur l'axe optique.

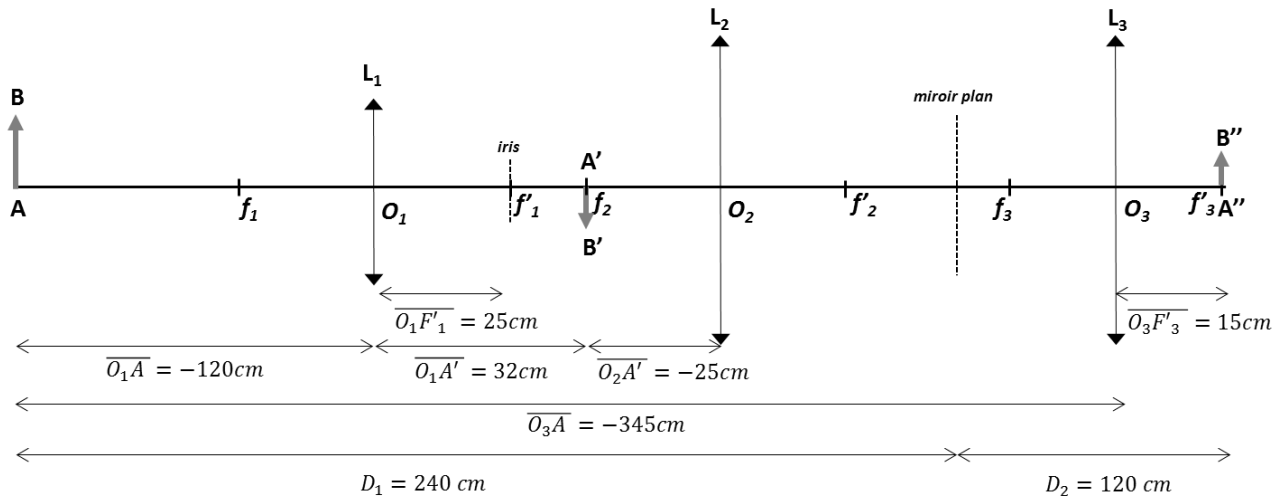


Figure 1.8 : Positionnement des lentilles sur l'axe optique

## 2. Caractéristiques du système optique

Le système optique ainsi mis en place peut être caractérisé en termes de grandissement et de résolution spatiale. La fonction d'appareil du monochromateur ainsi que la réponse complète de la chaîne d'acquisition en fonction de la longueur d'onde sont également des informations utiles pouvant conditionner le choix de l'utilisation de certaines méthodes.

### Grandissement

Une fois l'alignement des optiques réalisé, une image nette est obtenue sur la matrice CCD. La figure 1.9 présente l'image d'une pointe de cathode de 3,2mm affûtée à 60 degrés. Pour réaliser cette image, la pointe est éclairée par une lumière blanche, les fentes du monochromateur sont entièrement ouvertes et le réseau centré à l'ordre 0.

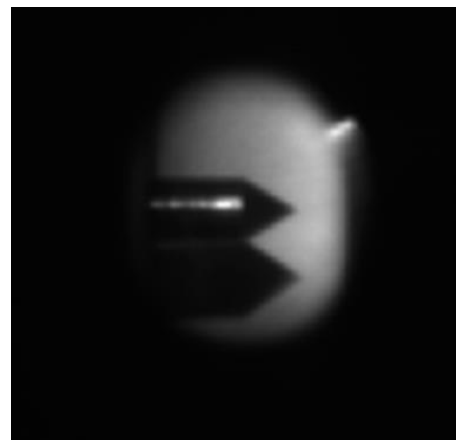
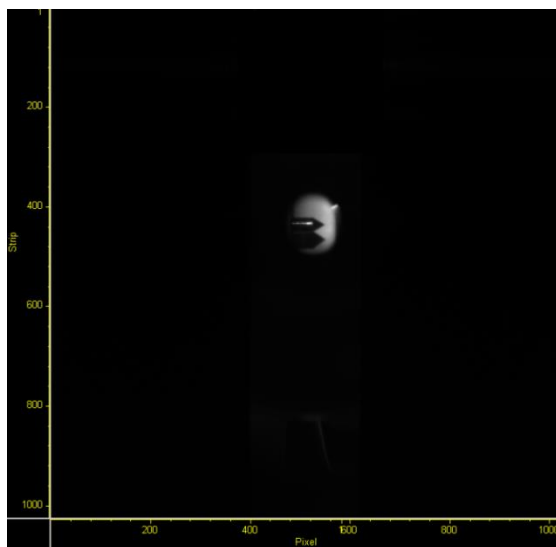


Figure 1.9 : Image obtenue sur la matrice d'une pointe de cathode de 3,2mm affûtée à 60 degrés après traversée du système optique

À partir de cette image, connaissant la taille d'un pixel ( $t_{pix}$ ), et le diamètre à la base ( $d_{base}$ ) de la pointe, le grandissement peut être calculé en mesurant le nombre de pixels correspondants ( $n_{pix}$ ) :

$$\gamma_{total} = \frac{t_{pix} * n_{pix}}{d_{base}} = \frac{13.10^{-3} * 27}{3.2} = 0.11 \quad (II.18)$$

Le grandissement obtenu est un peu plus faible que celui calculé théoriquement mais ceci peut être expliqué par le cumul des incertitudes sur les focales des lentilles et le positionnement des éléments.

### Sélection de rayons parallèles à l'axe optique

L'iris placé au foyer image de la lentille  $L_1$  permet de sélectionner les rayons parallèles issus du plasma et d'améliorer la profondeur de champ du système. La figure ci-dessous présente le principe de sélection des rayons parallèles de l'iris.

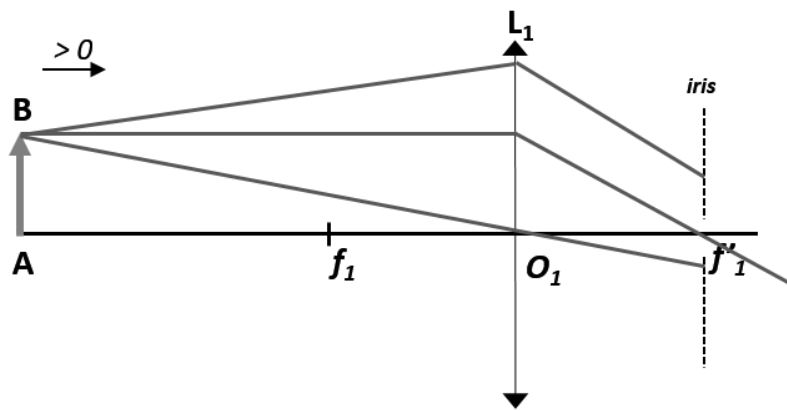


Figure 1.10 : Rôle de l'iris dans la sélection des rayons

Avec un iris de diamètre 2mm, les rayons d'angles supérieurs à  $0.20^\circ$  par rapport à l'axe optique sont stoppés. La résolution spatiale du système varie entre  $40\mu\text{m}$  et  $60\mu\text{m}$  pour un diamètre de plasma compris entre 10 et 15mm.

### Fonction d'appareil

La fonction d'appareil du monochromateur a été déterminée pour le réseau utilisé (1200 traits par millimètres). Pour cela, la largeur à mi-hauteur de raies du mercure ou d'argon issues de lampes basse pression a été mesurée et tracée en fonction de la longueur d'onde. La *figure 1.11* présente la fonction d'appareil pour le réseau 1200 traits par millimètre.

La réponse du monochromateur avec le réseau 1200 traits par mm a été interpolée par un polynôme d'ordre 3 sur la totalité de la plage de longueur d'onde utilisable avec ce réseau. Cependant, la matrice employée n'a pas une réponse efficace en deçà de 400nm et les raies utilisées dans cette étude ne vont pas au-delà de 800nm. Dans cette gamme spectrale, (ie 400-800nm) la fonction d'appareil est comprise entre 0.030 et 0.038nm.

Dans le cas de l'utilisation d'une méthode basée sur l'élargissement des raies, cet élargissement doit être pris en compte et retiré.

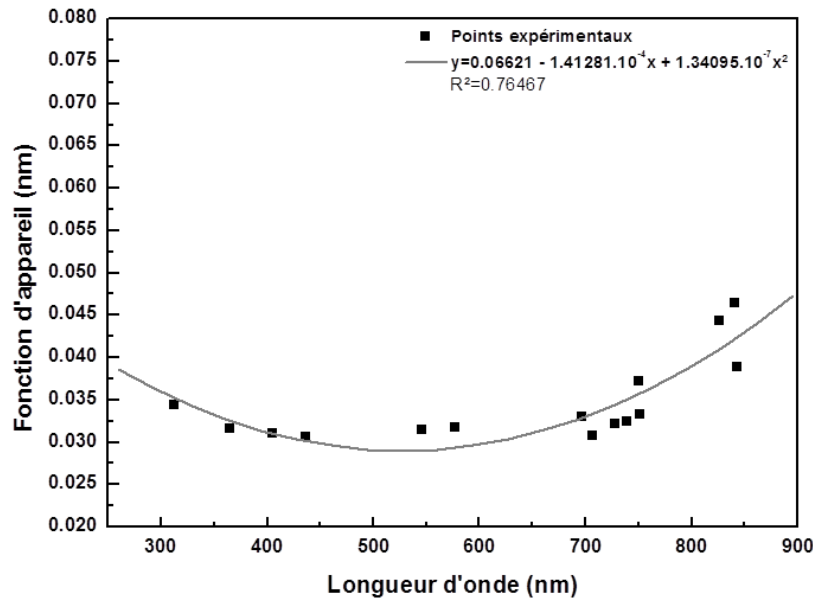


Figure 1.11 : Fonction d'appareil pour le réseau 1200 tr/mm

### Réponse du système optique complet

La chaîne d'acquisition mise en place utilise des éléments d'optique différents et des appareils ayant chacun une réponse en longueur d'onde bien définie. Pour déterminer cette caractéristique, une lampe à ruban de tungstène a été placée à la place de la torche TIG et la réponse en longueur d'onde a été tracée entre 400 et 800nm. La réponse ainsi obtenue a été pondérée de manière à n'obtenir que la réponse du système optique, la lampe étalon se comportant comme un corps gris. Sur la *figure 1.12*, la réponse du système optique et de la lampe étalon est représentée en noir et la réponse du système optique seul en rouge. Elle est maximale autour de 700nm.

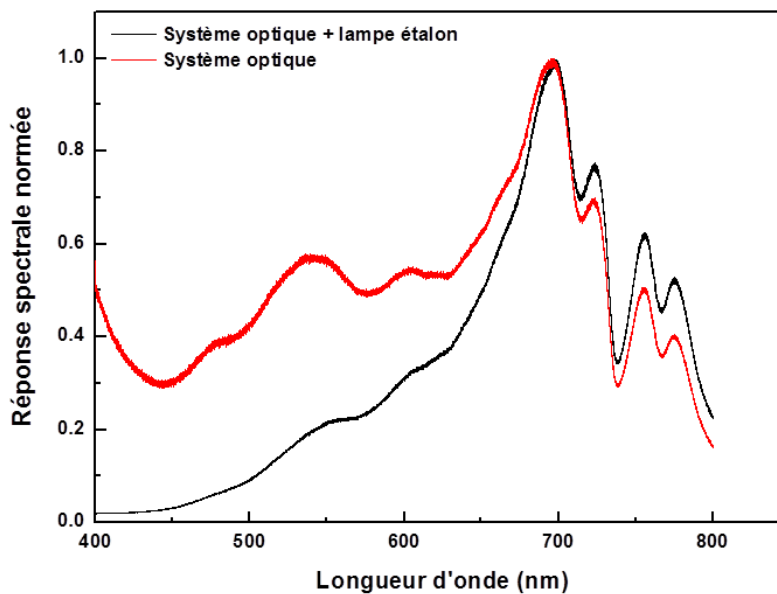


Figure 1.12 : Réponse spectrale du système optique

## IV. Application

Dans ce paragraphe, le principe de mesure par spectroscopie d'émission est appliqué à la configuration TIG afin de déterminer la température de la colonne plasma. L'interaction d'un arc avec l'acier entraîne la production de vapeurs métalliques qui contamine le milieu plasma. Dans un premier temps, l'influence des vapeurs de fer dans le traitement des données spectroscopiques est analysée. Dans une seconde partie, le champ de température obtenu lors de l'interaction d'un arc d'Arcal37 de longueur 5mm avec une anode en acier 304L sous une intensité de 100A est présenté et discuté. Enfin, l'effet de l'intensité du courant sur la température du milieu est évalué.

### 1. Vapeurs métalliques

Le spectre de l'arc a été réalisé afin d'observer les différentes espèces présentes dans la décharge. La figure ci-dessous présente le spectre de l'arc entre 400 et 600nm (*figure 1.13(a)*) et entre 600 et 800nm (*figure1.13(b)*) à 1.5mm de la surface de l'anode après 1 minute d'interaction.

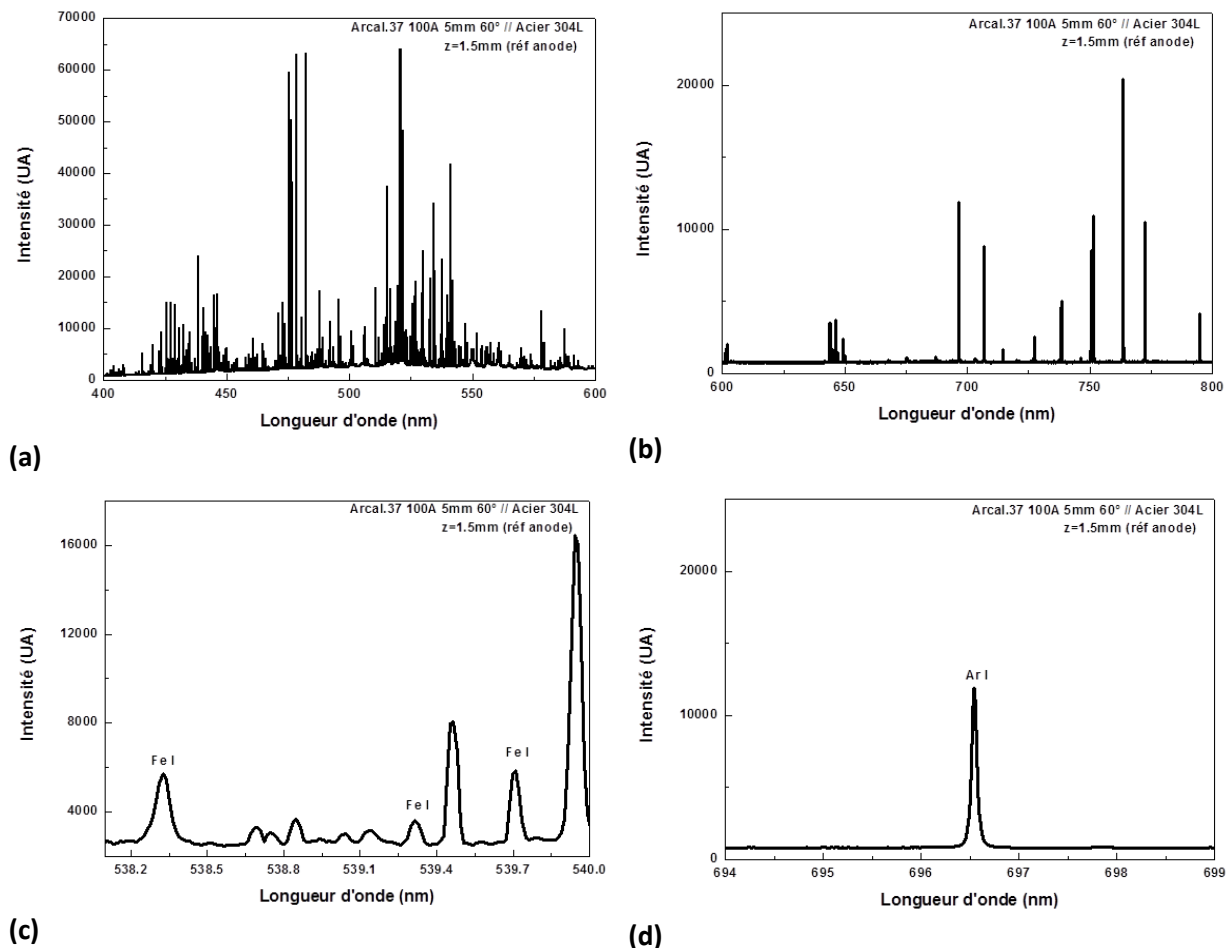


Figure 1.13 : Spectre de l'arc (a) entre 400 et 600nm (b) entre 600 et 800nm et identification des raies (c) du fer neutre et (d) de l'argon neutre

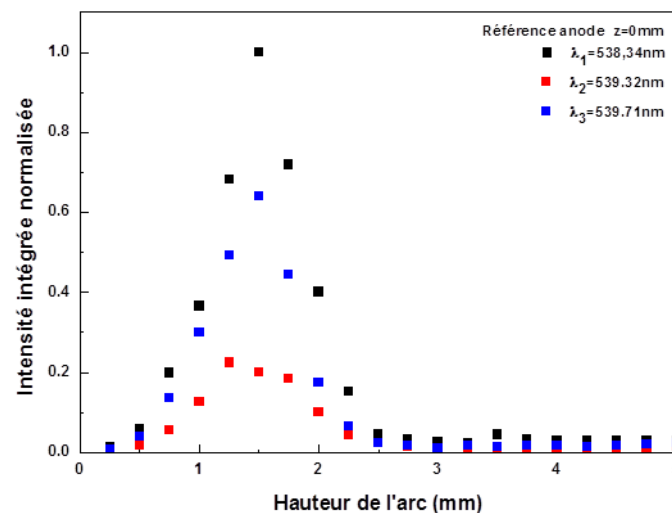
L'analyse du spectre de l'arc entre 400 et 600nm montre la présence de raies d'argon neutre et ionisé (ArI, ArII), d'hélium neutre et de nombreuses raies métalliques provenant de la vaporisation du

matériau d’anode (chrome, fer, manganèse). D’après les données du NIST, il existe 256 raies relatives aux espèces ArI, FeI, CrI et MnI sur cette plage de longueur d’onde. Toutes ne sont pas observables ici mais l’identification des espèces n’en reste pas moins complexe. Il persiste souvent un doute sur l’identification des raies métalliques mais trois raies de fer sont identifiables sur les spectres (*figure 1.13(c)*) et très souvent utilisées dans les travaux de la littérature. Les caractéristiques de ces raies, issues des données du NIST, sont regroupées dans le *tableau 1.1*. Entre 600 et 800nm, le spectre s’appauvrit et seules des raies d’argon sont suffisamment intenses pour être observées avec notre caméra. La *figure 1.13(d)* présente raie d’argon neutre 696.54nm, couramment utilisée dans les travaux de spectroscopie.

	Longueur d’onde	Énergie du niveau émetteur	Probabilité de transition	Dégénérescence
1	538.34 nm	6.61 eV	$7.87.10^7 \text{ s}^{-1}$	13
2	539.32 nm	5.53 eV	$4.91.10^6 \text{ s}^{-1}$	9
3	539.71 nm	3.21 eV	$2.58.10^5 \text{ s}^{-1}$	9

*Tableau 1.1 : Caractéristiques des raies du fer utilisées [données NIST]*

Afin de décrire le milieu plasma, ces trois raies ont été analysées en temps et sur toute la hauteur d’arc, l’intensité des raies du fer étant le reflet de la production de vapeurs. La *figure 1.14* présente l’évolution de l’intensité des raies du fer entre l’anode et la cathode pour un arc d’Arcal37 de longueur 5mm en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 100A.



*Figure 1.14 : Évolution de l’intensité des raies du fer pour un plasma d’Arcal37 de longueur 5mm sous une intensité de 100A*

L’intensité des trois raies sélectionnées décrit le même profil : une apparition rapide sur le premier millimètre avec une intensité maximale à 1.5mm de l’anode suivi d’une disparition nette au-delà de 2mm. Les vapeurs de fer sont donc présentes jusqu’à 2mm au-dessus de l’anode.

L’effet de l’intensité du courant sur cette distribution a également été étudié. La *figure 1.15* présente l’évolution de l’intensité de la raie n°1 pour des courants de 100 et 150A.

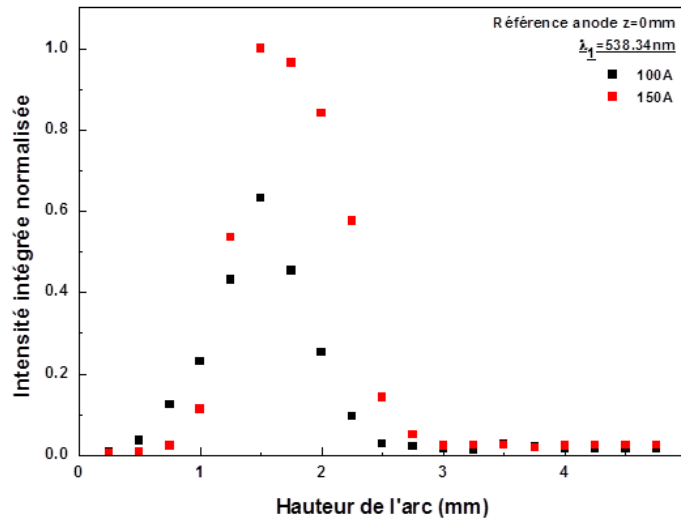


Figure 1.15 : Évolution de l'intensité de la raie 1 pour un arc d'Arcal37 de longueur 5mm pour deux intensités

L'élévation de l'intensité du courant montre une augmentation de l'intensité des raies. La distribution des vapeurs de fer suivant la hauteur de la décharge est légèrement modifiée : les vapeurs sont présentes jusqu'à 2.5mm dans le cas où l'intensité du courant est de 150A. La concentration de fer reste tout de même maximale à 1.5mm de la surface de l'anode. Ces observations indiquent une production légèrement plus importante de vapeurs lorsque le courant est plus élevé.

Ayant connaissance de la zone de la décharge où la production de vapeurs est maximale (à 1.5mm de la surface de l'anode), il est possible d'étudier le comportement des vapeurs dans le temps. La figure 1.16 présente l'évolution de l'intensité de la raie 1 en fonction du temps pour un arc d'Arcal37 de longueur 5mm sous une intensité de 100A. Deux séries d'acquisitions ont été réalisées afin de s'assurer de la reproductibilité. La distribution de l'intensité de la raie en fonction du temps pour les deux acquisitions montre une augmentation rapide de la production de vapeurs qui tend à se stabiliser au-delà de 12 secondes.

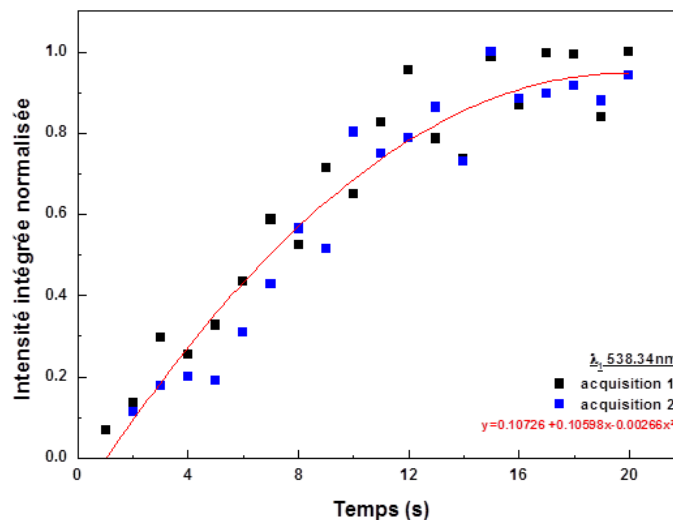
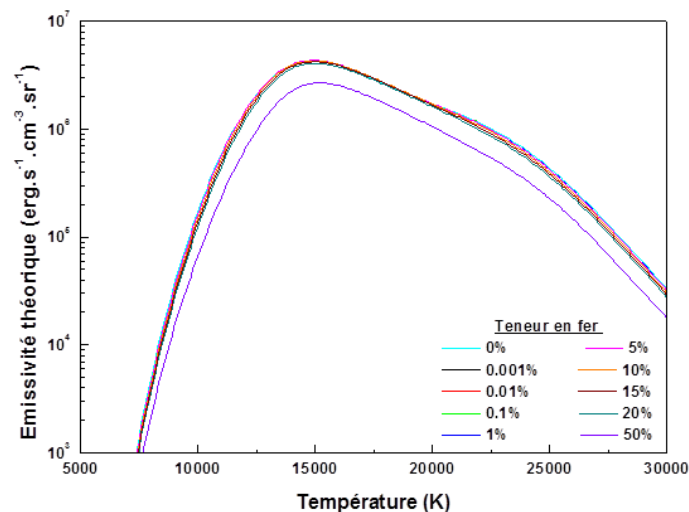


Figure 1.16 : Évolution de l'intensité de la raie 1 en fonction du temps pour un plasma d'Arcal37 de longueur 5mm sous une intensité de 100A

Dans cette section, une analyse de la distribution des vapeurs a été effectuée de manière à avoir connaissance du milieu à caractériser. Pour déterminer la température de la décharge, les raies doivent répondre à certains critères pour être utilisées. Le choix de la raie s'est porté vers la raie d'argon neutre 696.54nm qui réunit toutes les conditions d'utilisation : elle est intense, isolée, visible sur toute la hauteur d'arc et présente une faible auto absorption. De plus, son émissivité est indépendante de la teneur en fer du milieu jusqu'à une certaine concentration. La *figure 1.17* présente le profil d'émissivité théorique de la raie d'argon neutre ArI de longueur d'onde 696.54nm déterminé à partir de la composition du milieu. Le profil d'émissivité a été tracé pour des milieux contenant différentes proportions de fer. Il est observable sur cette figure que le profil d'émissivité dépend que très peu de la teneur en fer du milieu pour des faibles concentrations. La dépendance apparaît pour des milieux à forte concentration de fer (>20%). En effet, il est observé une variation de la température d'émission maximale de 300K lors du passage d'un milieu pur (0% de fer) à un milieu très concentré (50% de fer). L'effet du fer est également visible sur le maximum d'émissivité qui voit sa valeur diminuer de  $1.67 \cdot 10^6 \text{ erg.s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Afin de s'assurer de l'utilisation de cette raie pour la détermination de la température de la colonne plasma, les travaux de modélisation [Mou-13a] ont permis de connaître la teneur maximale en fer du milieu dans la décharge plasma. Pour un plasma d'Arcal37 en interaction avec une anode en acier 304 sous une intensité de 150A (équivalent à une puissance de 1500W), la concentration maximale de fer observée dans la décharge est estimée à 9.5% volumique. Dans le cas où la puissance serait plus élevée, de l'ordre de 2000W par exemple, la concentration maximale en fer ne dépasse pas les 12.5% volumique. Pour de telles concentrations, la variation de la température d'émission par rapport à un milieu pur est inférieure à 100K et le maximum d'émission ne varie que de  $0.04 \cdot 10^6 \text{ erg.s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Il faut cependant noter que les puissances calculées par le modèle ne prennent pas en compte les chutes de tension aux électrodes. Les valeurs de puissance annoncées par le modèle sont donc sous estimées par rapport à celle mesurées expérimentalement.



*Figure 1.17 : Émissivité de la raie d'argon neutre dans un plasma d'Arcal37 pour différentes proportions de fer dans le milieu*

Cette raie d'argon neutre peut donc être utilisée sans contrainte sur toute la hauteur d'arc, dans cette gamme de puissance, pour déterminer la température de la colonne plasma.

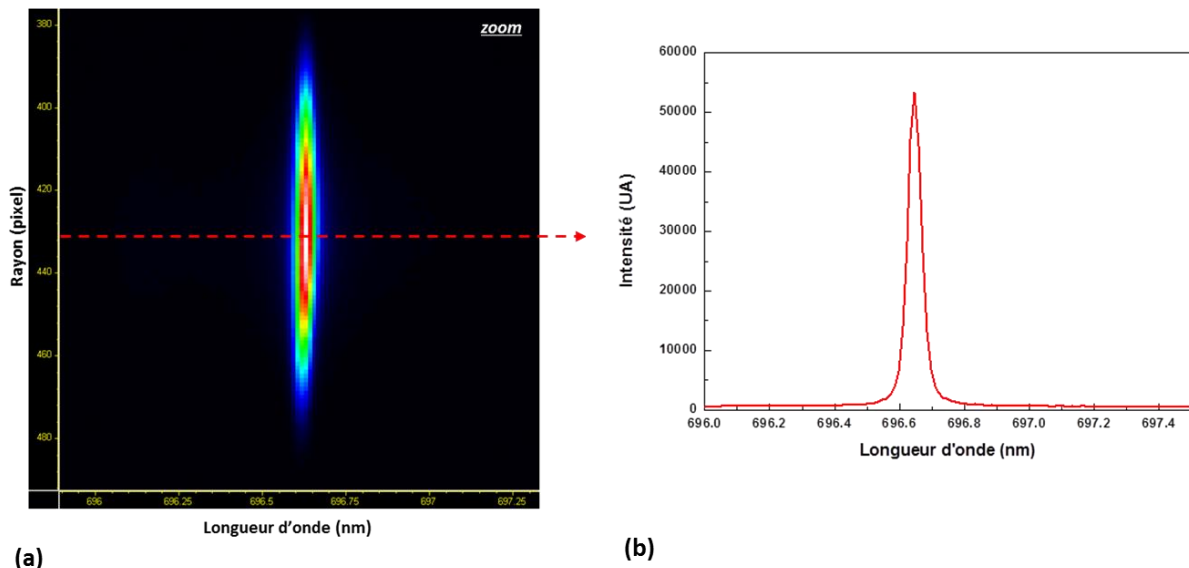


## 2. Température de la décharge

Dans cette section sont présentés les résultats obtenus dans le cas de l'interaction d'un arc d'Arcal37 en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 100A. Les acquisitions ont été effectuées avec le dispositif expérimental décrit dans le *paragraphe III*. La tension d'arc a également été mesurée ( $U_{arc} = 15.5V$ ) pour s'assurer de la possibilité de l'utilisation de la raie d'argon neutre selon les critères établis ci-dessus. L'intensité étant de 100A, la puissance injectée à l'arc est de 1550W, ce qui correspond à la gamme de puissance pour laquelle la teneur en fer dans le milieu n'affecte pas significativement l'émissivité de la raie 696.54nm.

### Traitement des données spectroscopiques

Comme cela a été évoqué lors de la présentation de la mise en œuvre expérimentale, les acquisitions ont été réalisées sur toute la hauteur du plasma : les informations sont obtenues sur 5mm de hauteur par pas de 0.25mm. La *figure 1.18(a)* présente l'image d'une côte de plasma obtenue sur la matrice. Pour faciliter l'observation, l'image est représentée sur une matrice réduite. L'échelle de couleur caractérise l'intensité de la raie en fonction de sa position spatiale (rayon) et de la longueur d'onde. Le centre de l'image (en blanc) est le lieu où l'émission de la raie est maximale et correspond au cœur de la colonne d'arc. Les zones en bleu sont représentatives d'une plus faible intensité correspondant notamment à l'émission de la raie en périphérie de l'arc. La *figure 1.18(b)* représente l'intensité de la raie en fonction de la longueur d'onde pour une ligne de la matrice (i.e un point du plasma), matérialisé par la flèche rouge. L'élargissement du profil de la raie observé fait suite aux contributions qui ont été détaillées dans le *paragraphe II*, notamment par la fonction d'appareil. À titre d'information, la largeur à mi-hauteur de cette raie est de 4 pixels soit 0.05nm.



*Figure 1.18 : (a) image sur la matrice d'une visée dans le plasma (b) intensité de la raie en fonction de la longueur d'onde pour un point du plasma*

Pour chaque acquisition le profil de la raie est intégré puis inversé permettant d'obtenir les valeurs d'émissivité en fonction du rayon du plasma, pour les différentes visées dans la colonne

d'arc. Les signaux obtenus pour des visées proches de l'anode (jusqu'à 2mm) nécessitent d'être interpolés pour corriger les instabilités dues au bruit qui peuvent apparaître lors de l'inversion d'Abel. La fonction mathématique utilisée associe un profil gaussien à un polynôme de degré pair [Bac13][Bor13] :

$$y = A(a + bx^2 + cx^4)e^{B-x^2/2\sigma^2} \quad (IV.1)$$

où  $A, B, a, b, c$  et  $\sigma$  sont les paramètres ajustables de l'interpolation déterminé par une régression du type des moindres carrés.

La figure ci-dessous présente le signal intégré pour une visée située à 0.5mm de la surface de l'anode et son profil interpolé.

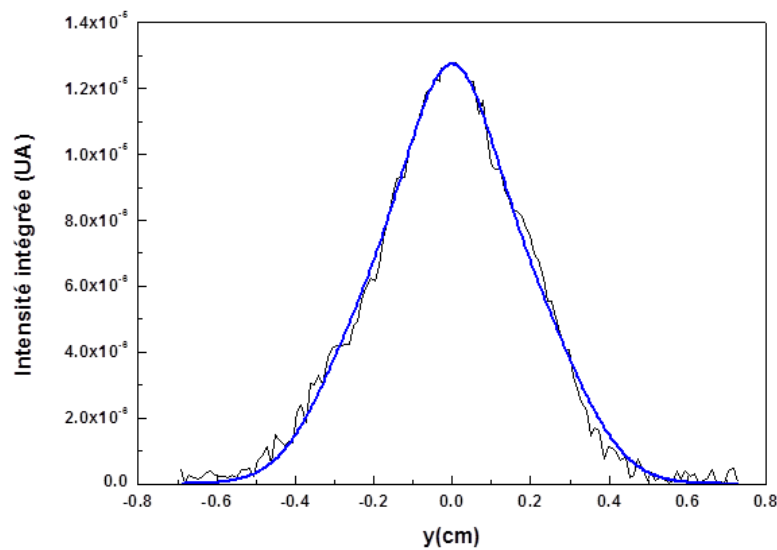
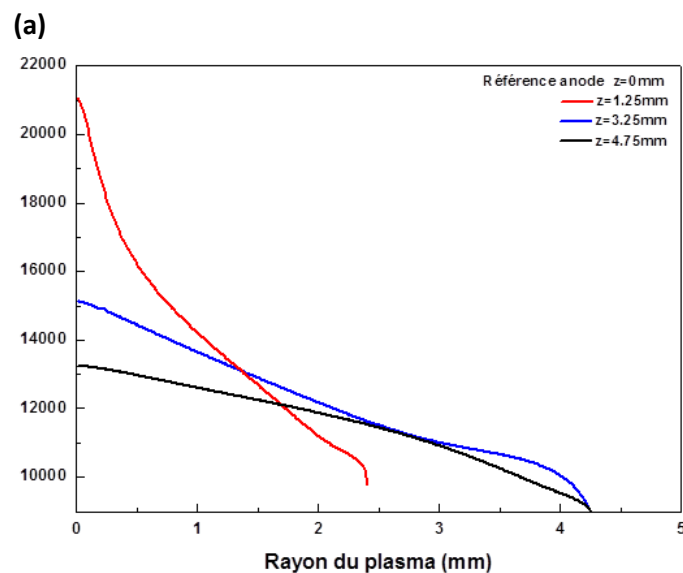
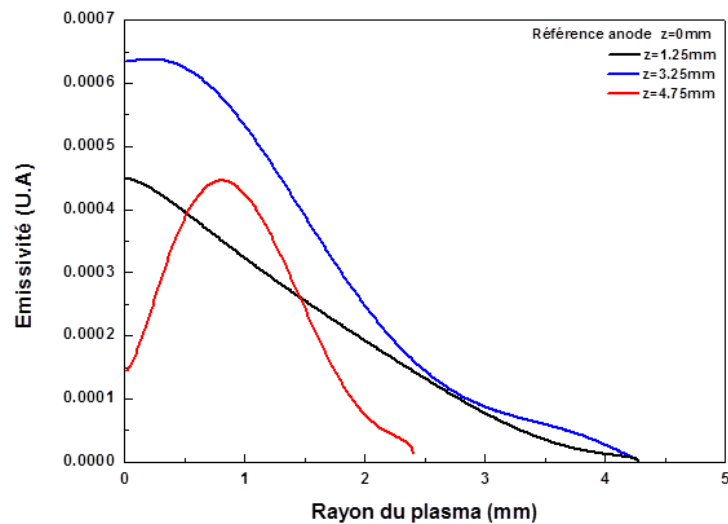


Figure 1.19 : Intensité intégrée et profil interpolé

La figure 1.20(a) présente trois profils d'émissivité en fonction du rayon du plasma obtenus pour une visée proche de l'anode ( $z=1.25\text{mm}$ ), une visée au milieu du plasma ( $z=3.25\text{mm}$ ) et une visée proche de la cathode ( $z=4.75\text{mm}$ ). Dans le cas de la visée proche anode, le profil d'émissivité est maximal sur l'axe et décroît en fonction du rayon du plasma. Pour la visée au milieu du plasma, le profil obtenu n'a pas la même allure : il est observé un maximum d'émissivité situé à 0.2mm de l'axe de la décharge. Ceci indique que la température sur ces premiers dixièmes millimètres dépasse la température maximale d'émission de cette raie ( $T_m = 14900\text{K}$ ). Pour la visée proche de la cathode, ce maximum est situé à 0.8mm de l'axe de la décharge avec un gradient d'émissivité plus marqué, donnant lieu à des températures encore plus élevées. L'obtention de profils présentant des maxima d'émissivité en dehors de l'axe de la décharge permet d'appliquer la méthode de Fowler-Milne pour déterminer la température correspondante telle qu'elle a été décrite au *paragraphe II*. Dans ce cas, un étalonnage avec une lampe à ruban de tungstène n'est pas nécessaire. Pour les profils ne possédant pas de maximum d'émissivité en dehors de l'axe de la décharge, la méthode de l'intensité absolue est appliquée et un facteur de conversion est introduit de manière à s'affranchir de l'étalonnage. Ce facteur de conversion est déterminé à partir du rapport entre la valeur du maximum d'émissivité théorique et expérimentale. La figure 1.20(b) présente les températures déduites pour

ces trois côtes. À 1.25mm de l’anode, la température est de 13236K sur l’axe et décroît suivant le rayon de la décharge jusqu’à atteindre environ 10900K à 3mm du centre de l’arc. Pour la côte positionnée à 3.25mm, la température est de 15120K sur l’axe et décroît jusqu’à atteindre 11020K à 3mm de l’axe de la décharge. Proche de la cathode, la température atteint les 21064K sur l’axe et décroît jusqu’à 12600K pour un rayon de 1.5mm. Il est également observable sur la *figure 1.20(b)* que le profil de température proche de la cathode est moins étendu radialement que les profils situés au centre ou proche de l’anode : en se rapprochant de la cathode, un gradient de température plus marqué est observé.

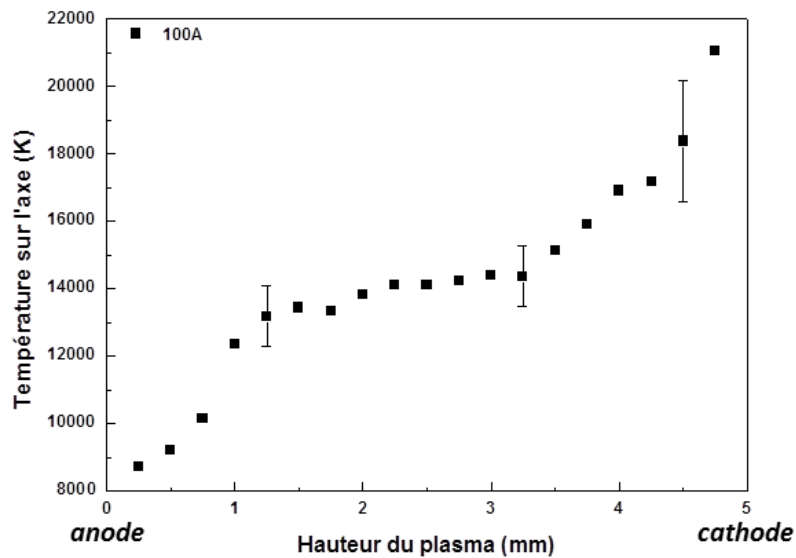


(b)

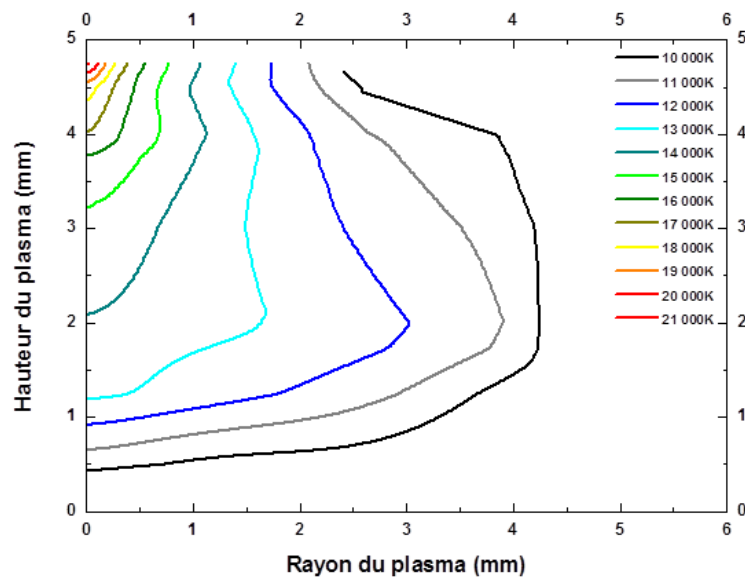
*Figure 1.20 : (a) profils d’émissivité expérimental et (b) températures correspondantes en fonction du rayon du plasma pour trois visées dans un plasma d’Arcal37 de longueur 5mm en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 100A*

Ces méthodes ont été appliquées pour toutes les visées effectuées et le champ de température complet de la décharge a été déduit. La *figure 1.21(a)* décrit l’évolution de la température sur l’axe en fonction de la hauteur de l’arc, la graduation 0mm correspondant à la

surface de l'anode. La température est maximale proche de la cathode où elle atteint les 21064K. La température proche anode est de l'ordre de 8900K. Les incertitudes sur la température n'ont pas été reportées sur tous les points pour ne pas encombrer la figure. Sur l'axe, cette incertitude est de  $\pm 1600\text{K}$  pour les points proches de la cathode et décroît à  $\pm 900\text{K}$  en s'approchant de l'anode. La *figure 1.21(b)* présente le champ de température du plasma en fonction du rayon du plasma et de sa hauteur. Les isothermes sont représentées entre 10000K et 21000K par pas de 1000K.



(a)



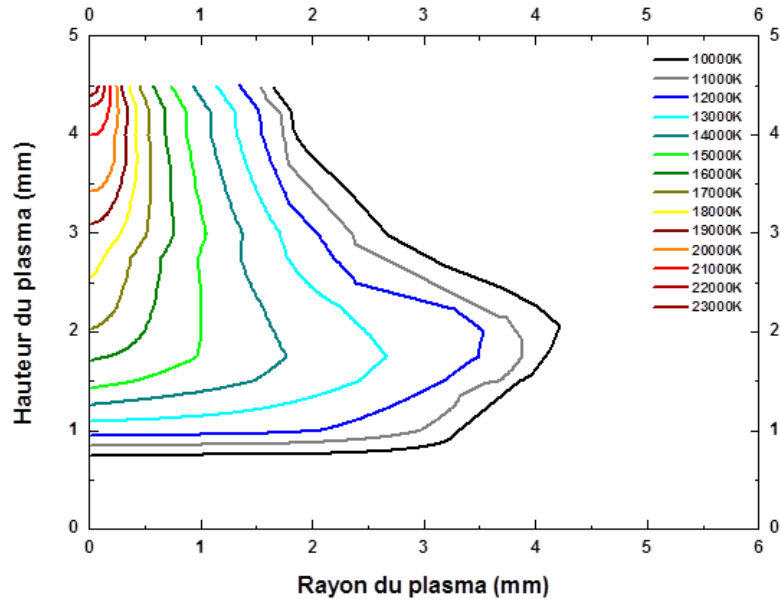
(b)

*Figure 1.21 : (a) température sur l'axe de la décharge (b) champ de température d'un plasma d'Arcal37 de longueur 5mm en interaction avec une anode en acier 304L sous une intensité de 100A*

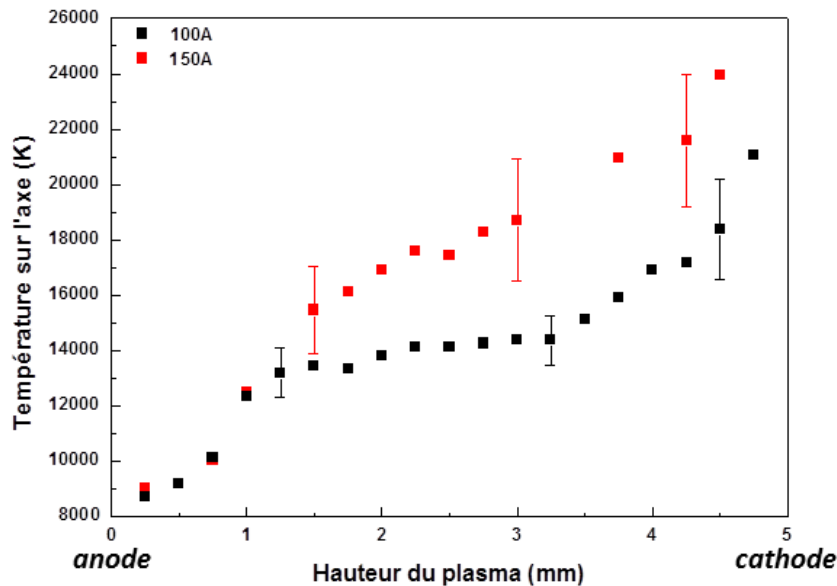
Les températures maximales sont observées au voisinage de la cathode. Les températures diminuent ensuite radialement et axialement. La distribution de ces températures indique également que le plasma s'étend sur rayon de 4.2mm.

**Influence de l'intensité du courant**

Le traitement des données expliqué ci-dessus a ensuite été appliqué en modifiant l'intensité du courant, permettant d'obtenir les températures d'un plasma d'Arcal37 en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 150A équivalent à une puissance de 2200W. La *figure 1.22(a)* présente le champ de température du plasma en fonction du rayon. De la même manière, les isothermes sont représentées entre 10000K et 23000K par pas de 1000K. La *figure 1.22(b)* décrit l'évolution de la température sur l'axe en fonction de la hauteur de l'arc pour les deux intensités étudiées, la graduation 0mm correspondant à la surface de l'anode.



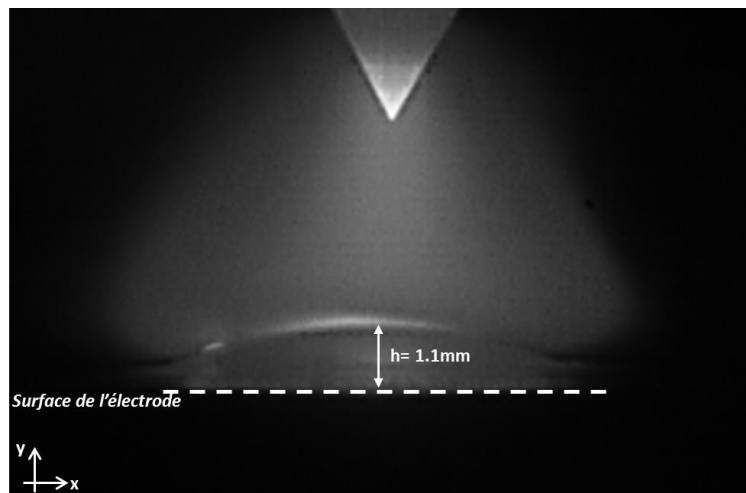
(a)



(b)

*Figure 1.22 : (a) champ de température d'un plasma d'Arcal37 de longueur 5mm en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 150A (b) comparaison du profil de température axial pour deux intensités*

La température est maximale proche de la cathode où elle atteint les 23942K et décroît axialement jusqu'à atteindre 8735K en surface de l'anode. La température maximale atteinte dans ce cas est plus élevée que celle estimée pour une intensité de 100A. Les isothermes présentent un étalement un peu plus marqué pour le cas à 150A excepté pour les isothermes 10000 K et 11000K qui indiquent que le plasma s'étend sur un rayon maximal de 4.2mm, équivalent à celui obtenu à 100A. En faisant exception de ces isothermes, il semble que l'élévation du courant, dans la gamme considérée ici, influe légèrement sur l'étalement de l'arc : l'isotherme 12000K indique un étalement de 3mm à 100A et de 3.52mm à 150A. De plus, le cas présenté à 150A montre une forme en cloche plus marquée que celui obtenu sous une intensité de 100A. En effet l'augmentation du courant est à l'origine de vitesses axiales dans le plasma plus élevées entraînant un écrasement du plasma proche anode plus important. L'évolution de la température sur l'axe (*figure 1.22(b)*) pour les deux cas présente la même allure. Des températures plus élevées sont atteintes plus près de la surface de l'anode dans le cas d'une intensité de 150A. Par exemple, la température de 15000K est observable à 1.5mm de la surface de l'anode à 150A alors qu'elle n'est atteinte qu'à 3.5mm pour le cas à 100A. Le milieu obtenu à 150A est donc globalement plus chaud sur toute la hauteur du plasma. Les températures obtenues proche de l'anode n'apparaissent pas modifiées par ce changement d'intensité. Les acquisitions réalisées jusqu'à 1mm de la surface de l'anode doivent être prises avec précaution. Lors de l'interaction de l'arc avec l'acier, un bain à l'allure concave se forme. La *figure 1.23* présente une image extraite d'une vidéo réalisée par imagerie rapide durant 20 secondes, sans refroidissement, sur un plasma d'Arcal37 en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 100A. La formation du dôme est visible sur cette image. La hauteur maximale est estimée à 1.1mm.



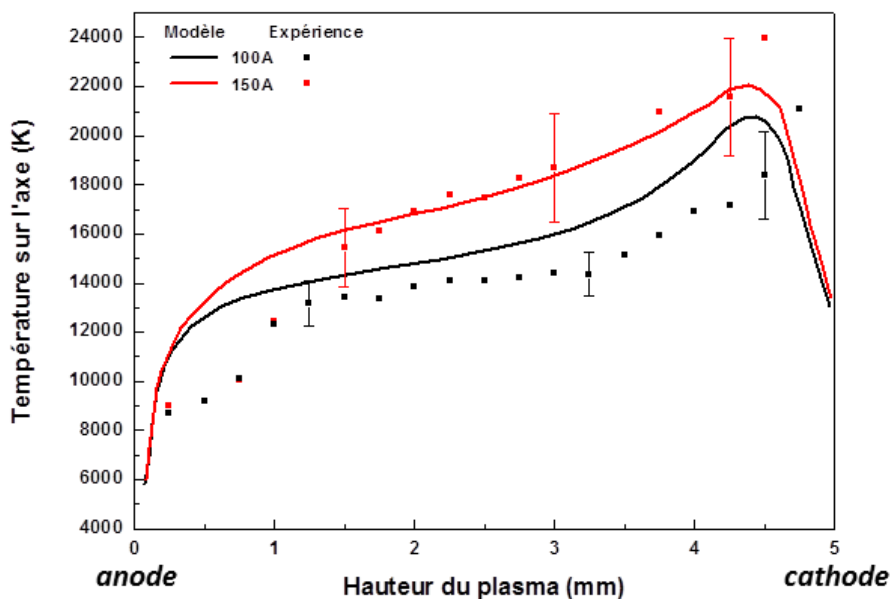
*Figure 1.23 : Visualisation de la forme concave du bain métallique sur une image extraite d'une vidéo rapide lors de l'interaction d'un plasma d'Arcal37 de longueur 5mm avec un acier 304L sous une intensité de 100A*

Les mesures de spectroscopie sont réalisées en refroidissant le matériau pour pouvoir durer plusieurs minutes et permettre de réaliser les acquisitions sur toute la hauteur de l'arc. La présence du dôme est néanmoins observable. Cette zone peut donc être à l'origine de perturbation lors des premières visées spectroscopiques.

L'augmentation du courant, pour la gamme étudiée, a donc une influence sur la température maximale atteinte dans le plasma et engendre un milieu plus chaud. La modification de ce paramètre semble également modifier la distribution radiale des températures, avec un étalement plus marqué à 150A. Les résultats obtenus sont maintenant discutés avec les travaux de la littérature.

### Discussion

Les résultats obtenus expérimentalement ont ensuite été comparés aux données présentes dans la littérature. Dans nos recherches, il n'a pas été trouvé de travail expérimental réalisé sur un arc de soudage de 5mm dans un gaz tel que l'Arcal37. Les températures et profils obtenus ont donc été comparés à des travaux de modélisation. La configuration la plus proche de celle utilisée dans cette étude correspond aux travaux théoriques de *J Mougnot*. La *figure 1.24* présente l'évolution de la température sur l'axe en fonction de la hauteur de plasma obtenue par la modélisation et par l'expérience pour les deux intensités considérées. Dans les deux cas, l'augmentation de l'intensité conduit à des profils de température plus élevés. La comparaison des températures proches de l'anode reste délicate et de forts écarts sont obtenus entre le modèle, qui considère une surface indéformable et l'expérience qui révèle la présence d'un dôme liquide évoqué à la section précédente. Au milieu de plasma, la température présente la même allure dans le cas du modèle et de l'expérience : elle augmente progressivement et le gradient de température est peu important entre 1 et 4mm. L'écart dans les valeurs de température entre modèle et expérience est un peu plus notable à 100A qu'à 150A. Au-delà de 4mm, lieu où l'émission électronique est plus importante, le gradient de température devient plus marqué. Les températures maximales obtenues par le modèle (resp. l'expérience) sont de 20844K (resp. 21064K) pour une intensité de 100A et 23942K (resp. 22066K) pour une intensité de 150A.



*Figure 1.24 : Comparaison modèle expérience*

## V. Conclusion

Dans ce chapitre, le système optique mis en place sur la configuration pour la détermination de la température du plasma par spectroscopie d'émission a été présenté. La méthode d'analyse de ces données a ensuite été décrite au travers d'acquisitions réalisées sur un plasma d'Arcal37 en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 100A. La température de ce milieu a ainsi été obtenue. L'effet de la variation de l'intensité du courant a été étudié montrant que, pour un même gaz et une même longueur d'arc, l'augmentation du courant donnait lieu à un milieu plus chaud. Des précisions ont été apportées sur la distribution des vapeurs métalliques issues de l'érosion du matériau d'anode sur la hauteur du plasma et dans le temps. Dans les conditions opératoires utilisées, les vapeurs de fer s'élèvent à 1.5mm de la surface de l'anode et semblent se stabiliser après quelques secondes d'interaction. Enfin, les résultats ont été comparés à ceux déterminés par un modèle théorique montrant des ordres de grandeurs cohérents. Néanmoins, ces différentes étapes ont permis de réaliser la complexité de ce type d'acquisitions :

- la richesse des éléments présents dans le spectre de l'arc due à l'évaporation du matériau rend difficile l'identification des espèces et donc l'utilisation de certaines raies,

- selon les proportions de fer présentes dans le milieu, la raie d'argon neutre de longueur d'onde 696.54nm doit être utilisée avec précaution,

- la présence du bain métallique rend difficile la détermination de la température du plasma sur le premier millimètre,

- l'inversion d'Abel reste un point critique dans le traitement des données spectroscopiques et nécessite au préalable la mise en place d'un lissage des données.

L'analyse de la production de vapeurs réalisée dans ces travaux a été étudiée qualitativement. Il serait intéressant maintenant de réaliser une étude quantitative permettant l'estimation d'une proportion de fer au sein du milieu. L'étude pourrait ensuite être étendue à l'effet de différents paramètres opératoires (nature du gaz, longueur de l'arc, angle de cathode, débit de gaz...) sur la teneur en fer et la température du milieu.

\*\*\*





# **CHAPITRE 2 - Étude de l'interface arc-liquide**



Ce chapitre présente le travail réalisé autour de l'interface arc-liquide sur une configuration de soudage TIG. Dans un premier temps, le comportement du bain liquide au travers des différentes forces qui s'y exercent est présenté. Dans un second temps, une revue non exhaustive des travaux théoriques autour du bain métallique ainsi que les principales méthodes employées pour le caractériser expérimentalement sont présentées. Dans une troisième partie, le dispositif expérimental mis en place dans le cadre de cette étude est détaillé et les vitesses en surface du bain métallique obtenues sur notre configuration sont exposées et comparées aux travaux de la littérature et à la simulation numérique effectuée au sein de notre équipe.

## **I. Comportement du bain liquide**

Le bain de fusion se définit comme le volume impliqué dans la géométrie de la soudure. Il dépend de différents paramètres tels que la forme et la température de l'arc et des mouvements qui l'animent. Ces mouvements proviennent de différentes forces s'exerçant au sein du liquide et en surface qui, selon leurs orientations, conditionnent l'allure mouillante ou pénétrante du volume en fusion. Les sections ci-dessous présentent les différentes forces qui s'exercent à l'interface entre l'arc et le liquide puis dans le volume en précisant leur influence sur la morphologie du bain.

### **1. Forces surfaciques**

#### **Pression d'arc**

Les forces de pression résultent de l'action de forces perpendiculaires à une surface. Dans une configuration de soudage, le fluide mis en mouvement dans le plasma percute la zone liquide et conduit, selon sa vitesse, à une déformation de la surface. Cette pression d'arc dépend de paramètres tels que la longueur d'arc, l'intensité du courant [Hsu83] [Fan96] [Rok93]. Ces auteurs s'accordent à dire qu'à faible courant, pour une longueur d'arc donnée, la pression d'arc a une influence quasi nulle sur la pénétration du bain alors qu'elle est prédominante à fort courant. De même, à intensité constante, l'allongement de l'arc provoque une augmentation des forces de pression en surface et conduit donc à un courant pénétrant.

#### **Forces de cisaillement**

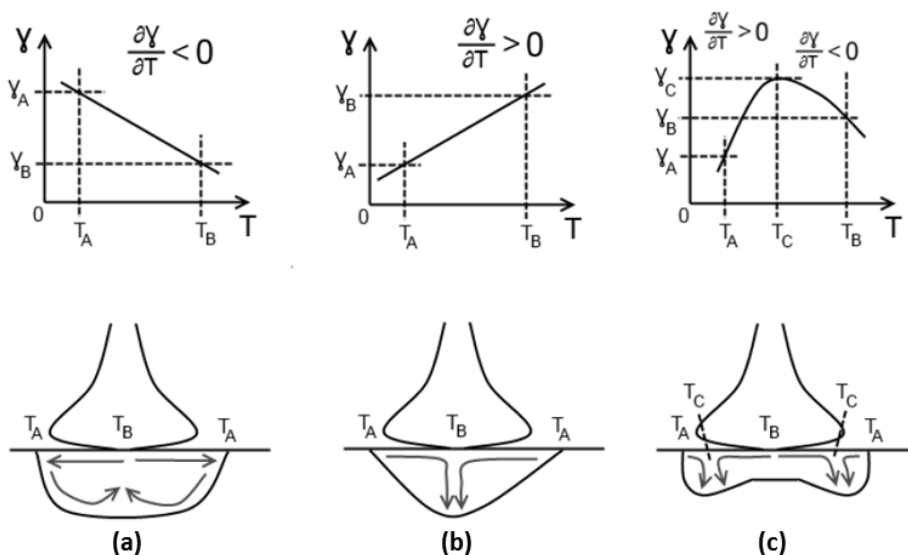
Les forces de cisaillement sont le résultat du passage du gaz plasmagène en surface du bain. Pour un arc symétrique, ces forces créent un mouvement de convection orienté du centre vers la périphérie du bain. Ceci conduit à des mouvements mouillants et donc à un élargissement du bain. Cette force est liée à la viscosité et dépend donc de la nature du gaz et de son débit. Certains travaux se sont intéressés à l'influence de la nature du gaz sur les vitesses en surface du bain induites par ces forces de cisaillement : le passage de l'argon à l'hélium pour un même courant et une même longueur d'arc (150A, 5mm) modifie la valeur de vitesse de 47 à 11  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  [Tan07]. Par ailleurs, il semble que pour une intensité de courant inférieure à 300A, les forces de cisaillement produisent des effets négligeables sur la morphologie du bain [Cho91]. Il faut cependant noter que ces conclusions ont été déduites de tests menés sur un arc court (1,5mm). L'augmentation de la

longueur d'arc semble conduire à une augmentation des forces de cisaillement, cette conclusion doit être prise avec précaution.

**Forces thermocapillaires ou de Marangoni**

Les mouvements de Marangoni résultent des modifications de la tension de surface. Selon l'orientation de ces mouvements de convection et s'ils sont suffisamment intenses, les morphologies de bain obtenues sont différentes. La tension superficielle ou tension de surface est une force dirigée vers le liquide qui modifie la forme de l'interface entre deux milieux. Elle est notée  $\gamma$  et dépend de la température et de la nature du matériau. La différence de température au sein du bain entraîne des mouvements convectifs dépendant du gradient de tension de surface au travers du signe du coefficient de Marangoni  $\frac{d\gamma}{dT}$ . Trois cas, représentés sur la *figure 2.1* sont distingués :

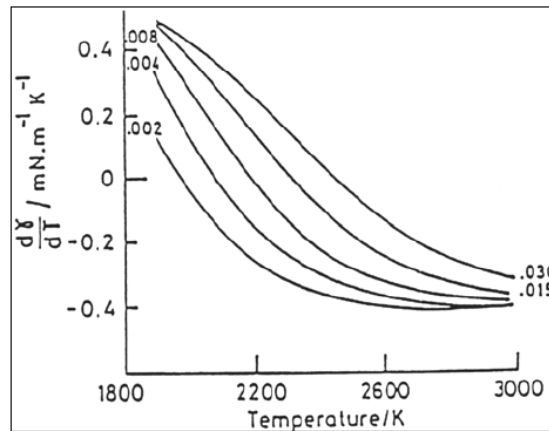
- *la tension de surface diminue avec la température (figure 2.1(a))*: le bain est plus chaud au centre ( $T_B$ ) qu'en périphérie ( $T_A$ ) induisant une tension de surface plus faible au centre ( $\gamma_B$ ) qui conduit à des mouvements dirigés du centre vers les bords. Les mouvements de Marangoni ont une allure mouillante.
- *la tension de surface augmente avec la température (figure 2.1(b))*: il s'agit du phénomène inverse de celui décrit ci-dessus. Les mouvements sont dirigés des bords du bain vers le centre. Les mouvements de Marangoni sont pénétrants.
- *la tension de surface augmente puis diminue avec la température (figure 2.1(c))*: les deux effets sont présents entraînant un phénomène de double vortex. La température pour laquelle la dépendance en température de la tension de surface est modifiée est appelée température d'inversion ( $T_C$ ).



*Figure 2.1: Influence du signe du coefficient de Marangoni sur les courants convectifs [Mou13a][Mil98]*

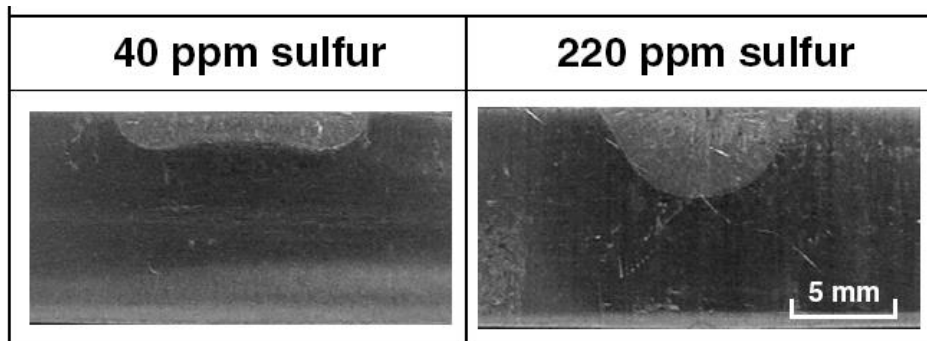
Les mouvements de Marangoni dépendent aussi de la nature du matériau selon la concentration en éléments actifs tels que l'oxygène, le soufre ou le sélénium qu'il peut contenir. La

teneur en éléments actifs influe sur la température d'inversion. La figure ci-dessous présente l'évolution du coefficient de Marangoni en fonction de la température pour différentes proportions de soufre contenu dans du fer.



*Figure 2.2 : Évolution du coefficient de Marangoni en fonction de la température pour différentes concentrations de soufre [Per00]*

La température d'inversion augmente avec la concentration des impuretés. Dans le cas du soudage, la teneur en éléments actifs du métal est généralement connue et fixe. Par exemple, lors de l'utilisation d'acier à faible concentration de soufre (40ppm) ou d'un acier à forte concentration en soufre (200ppm) en interaction avec un arc d'argon de 5mm sous une intensité de 150A, les formes de bain obtenues sont différentes (figure 2.3) :



*Figure 2.3 : Morphologies de bain obtenues par macrographie de la zone fondue dans le cas de l'interaction d'un arc d'argon de 5mm avec un acier à faible (gauche) et haute (droite) teneur en soufre sous une intensité de 150A [Tan07]*

Connaissant l'effet de la concentration en éléments actifs sur les courants de Marangoni, l'utilisation de gaz de protection enrichi en oxygène [Lu08] ou le dépôt d'oxyde en surface de la pièce [Ber12] permet d'influer sur les morphologies de bain.

## **2. Forces internes au bain**

### **Forces de Lorentz**

Les forces de Lorentz intervenant au sein du métal fondu proviennent du champ magnétique induit par l'arc. Ces courants résultants peuvent modifier la géométrie de la zone fondue. Lorsque l'arc est statique, il y a création de mouvements symétriques entraînant le fluide de la périphérie vers

le centre du bain. Ces mouvements ont donc tendance à creuser le bain en son milieu. La vitesse de ces mouvements dépend de l'intensité du champ magnétique et donc de l'intensité du courant et de la distribution de la densité de courant en surface du liquide. Cette dernière évolue en fonction de la longueur de l'arc, de la nature du gaz, de l'intensité du courant et de la nature du matériau de la pièce métallique. Par exemple, les vitesses maximales atteintes par les mouvements résultants des forces de Lorentz peuvent varier de  $5\text{cm.s}^{-1}$  à  $25\text{cm.s}^{-1}$  pour un arc de 5mm sous une intensité de 150A selon l'utilisation d'argon ou d'hélium [Tan07].

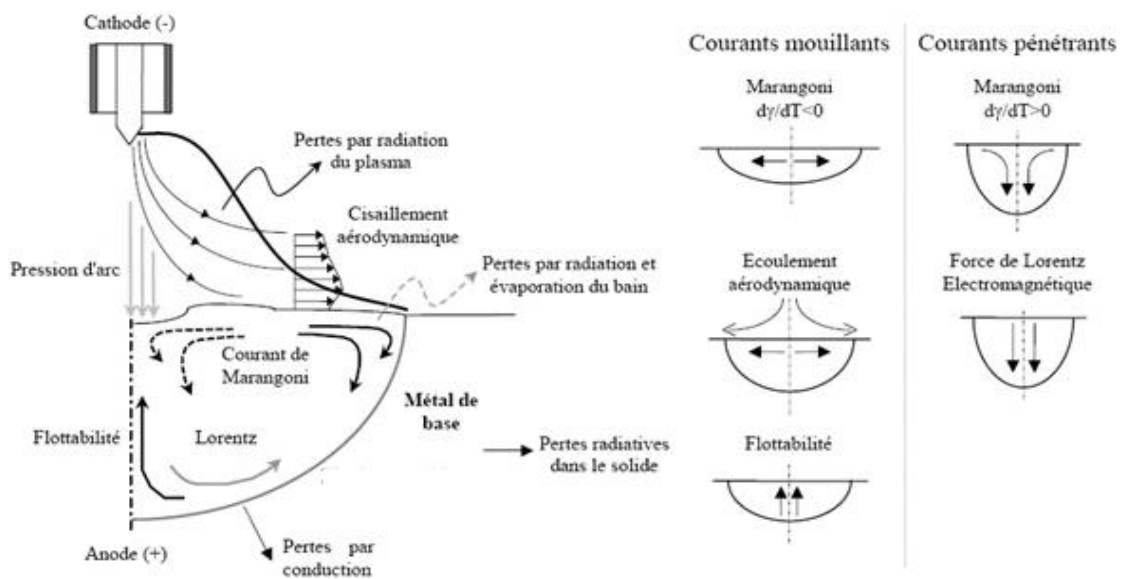
**Forces de flottabilité**

Les forces de flottabilité sont issues des gradients thermiques dans le fluide qui provoquent des variations de la masse volumique. La densité du métal diminuant avec la température et le centre du bain étant plus chaud, les zones les plus denses sont attirées vers le bas et le métal chauffé remonte. Ceci provoque un mouvement ayant tendance à élargir le bain. Cependant leur contribution aux mouvements dans le bain est faible et négligeable devant les autres phénomènes [Tan07].

**Forces de cisaillement liquide/solide**

Les forces de cisaillement impliquées dans ce cas résultent du changement de viscosité entre la phase liquide et solide. Dans cette zone qualifiée de « zone pâteuse », la vitesse de l'écoulement est fortement diminuée. Cette force est de plusieurs ordres de grandeurs inférieures aux autres [Bro09].

La *figure 2.4* résume l'action des différentes forces exposées ainsi que leur influence sur l'obtention d'une morphologie de bain à l'allure pénétrante ou mouillante. Ce bilan est complété par la représentation des pertes radiatives (plasma, bain, solide) ainsi que des pertes par conduction dans le métal.



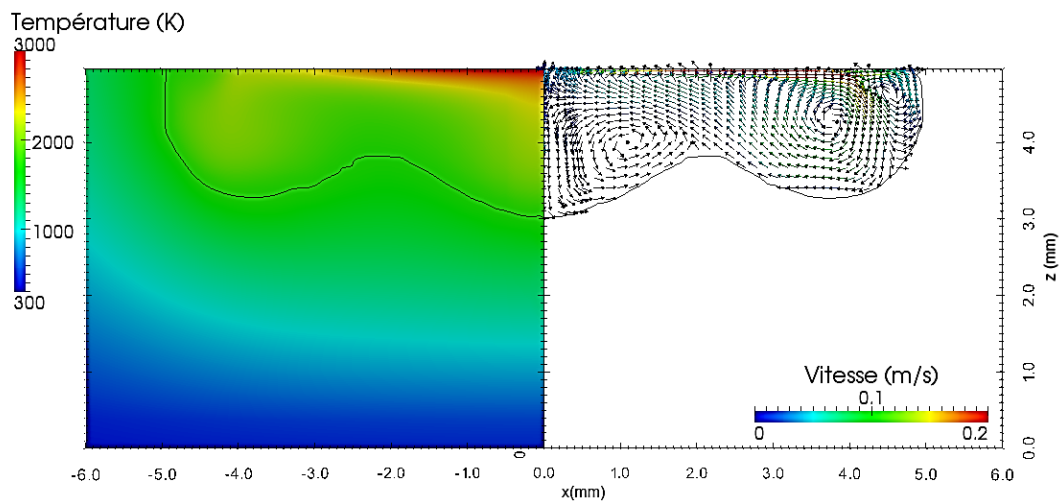
*Figure 2.4 : Forces s'exerçant dans le bain de fusion (à gauche) et leurs influences sur sa morphologie (à droite) [Per00]*

## II. Caractérisation de l'interface

Dans le procédé TIG, le transfert d'énergie entre l'arc et l'anode crée un bain de fusion qui est le siège de différents mouvements. Ces mouvements affectent la morphologie de la soudure, une fois le métal solidifié. La compréhension des mécanismes régissant le procédé passe par l'étude de cette zone liquide pendant son interaction avec l'arc. La première section est consacrée aux travaux théoriques relatifs à l'étude du bain liquide. La seconde section s'intéresse aux travaux expérimentaux permettant de caractériser les mouvements présents dans le bain de fusion à travers les différentes méthodes de diagnostic pouvant être utilisées.

### Les travaux théoriques

Comme évoqué au *Chapitre 1*, la prise en compte du couplage entre l'arc et le matériau en incluant une description de l'hydrodynamique dans la modélisation du matériau permet d'étudier les mouvements présents dans le bain liquide. Ces modèles s'intéressent à l'effet des paramètres opératoires sur la forme des bains mais également à la prépondérance des forces qui ont été présentées dans le *paragraphe 1* et aux vitesses qu'elles engendrent. Un des intérêts de la simulation numérique est de pouvoir isoler certains paramètres afin d'en observer les effets. Par exemple, l'étude des contributions de chaque force pour un plasma d'Arca137 de 5mm en interaction avec un acier 304 à haute teneur en soufre (200ppm) sous une intensité de 200A a montré que la force de Marangoni était la plus influente en ayant tendance à augmenter les vitesses et la largeur du bain [Mou13a]. La *figure 2.5* illustre le type de résultats pouvant être obtenus par modélisation, lorsque toutes les forces sont prises en compte. La partie gauche de la figure représente la distribution des températures dans le bain. La température est maximale en surface et au centre du bain où elle atteint les 2937K. La partie droite représente la distribution des vitesses dans le bain. Les vitesses maximales estimées pour ce cas sont de l'ordre  $45\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Il faut noter que l'échelle de couleurs relatives aux vitesses a été limitée à une valeur plus basse que la valeur maximale réelle de manière à avoir une meilleure lecture de la distribution de ces vitesses dans le volume.



*Figure 2.5 : Profil de bain, températures et vitesses obtenus dans le cas d'un plasma d'Arca137 de 5mm en interaction avec un acier 304 à haute teneur en soufre (200ppm) sous une intensité de 200A [Mou13a]*



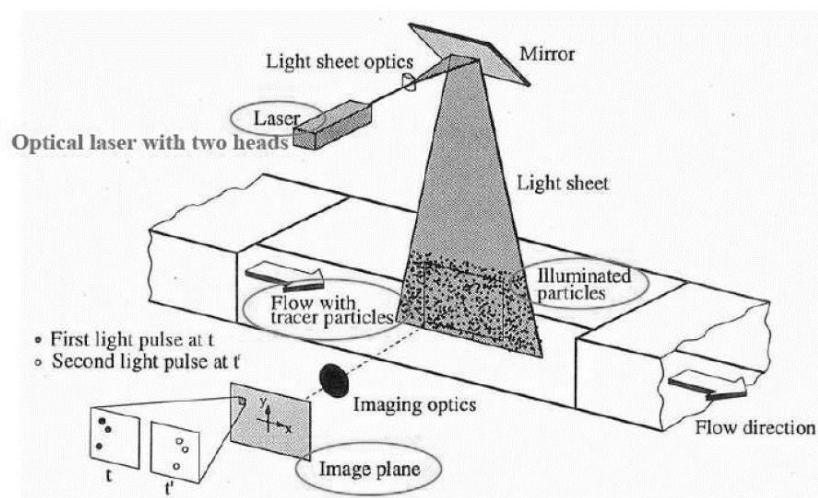
Les travaux de la littérature relatifs à l'étude du brassage dans le bain sur une configuration TIG fournissent des valeurs de vitesses dans la zone liquide pour différents paramètres opératoires. Cependant, la description mathématique utilisée ainsi que les phénomènes physiques pris en compte lors des simulations peuvent varier d'une étude à l'autre. À titre d'exemple, la vitesse estimée dans le cas d'un plasma d'argon de longueur 5mm en interaction avec un acier 304 à haute teneur en soufre (220ppm) sous une intensité de 150A est de l'ordre de  $60\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  [Tan07]. Dans ce cas, les résultats ont été obtenus sans prendre en compte l'effet des vapeurs métalliques et en considérant un coefficient de Marangoni invariant avec la température. L'importance de la prise en compte de ces deux éléments est détaillée dans les travaux de thèse de *J Mougenot* [Mou13a].

### **Les travaux expérimentaux**

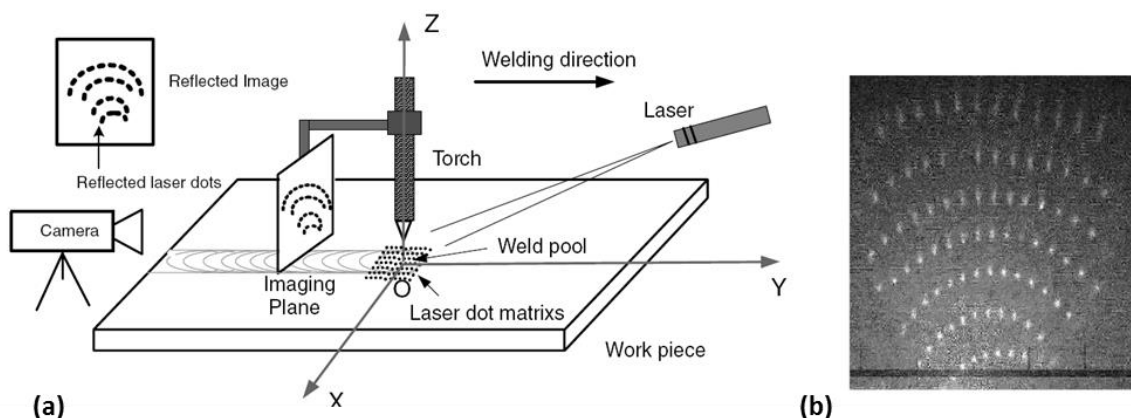
Différentes méthodes de diagnostic existent pour caractériser les mouvements du bain et leur vitesse. Les méthodes utilisées dans les travaux de la littérature sont essentiellement basées sur le suivi de particules. Ce dernier peut être fait à partir des oxydes naturels présents dans le matériau qui se détachent et naviguent en surface lors de la fusion du métal. Dans ce cas, une particule ou un agglomérat de particules est suivi sur plusieurs images consécutives. En connaissant la distance parcourue et le temps écoulé entre les images, la vitesse de la particule peut être estimée. Les travaux de *P Henrikson* ont été réalisés sur un arc d'argon de longueur 1.6mm en interaction avec une anode en acier 316L. Une lampe à vapeurs de mercure éclaire la surface du métal et les images récupérées par caméra rapide ont permis d'évaluer des vitesses maximales en périphérie du bain de l'ordre de  $13\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  [Hen05]. De la même manière, des vitesses de l'ordre de  $22\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  ont été estimées pour un arc d'argon de 4mm en interaction avec un acier HY80 [Esp91]. Sur le même principe, il est possible de déposer au préalable une fine couche d'oxyde en surface de l'anode jouant le rôle de « particules traceuses ». La région d'intérêt est illuminée et une image de cette région est acquise à deux instants différents. L'analyse de ces images conduit à une représentation des vecteurs vitesses instantanées. La *figure 2.6* présente le type de dispositif expérimental mis en place pour l'utilisation de cette technique. Le système d'illumination utilisé ici est un laser He-Ne de 10mW et une caméra rapide dotée d'un filtre 632nm récupère les images. Les auteurs précisent observer différents types d'écoulements durant leurs acquisitions (mouvements dirigés du centre vers la périphérie, de la périphérie vers le centre et mouvements rotationnels). Les valeurs de vitesses obtenues par cette méthode dans le cas d'un arc d'argon de 3mm en interaction avec une anode en acier 316L sous une intensité de 80A sont de l'ordre de  $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  [Zah09a]. Ces méthodes de suivi de particules permettent de caractériser les mouvements en surface du bain et d'en estimer les vitesses de déplacement mais ne garantissent pas que les vitesses évaluées correspondent bien au mouvement du fluide et non pas aux particules elles-mêmes. De plus, le dépôt d'une couche d'oxyde en surface du matériau pose la question de l'intrusivité de cette méthode vis-à-vis de l'influence de certains types d'éléments sur les courants de Marangoni notamment.

L'autre méthode de diagnostic envisagée dans la littérature repose sur la reconstruction 3D par stéréovision [Zha09b] ou par projection d'une lumière structurée [Son07]. La première méthode consiste à reconstruire une structure 3D à partir de plusieurs images obtenues sous différents

angles. La technique mise en place par ces auteurs est réalisée sur une configuration de soudage laser et utilise un jeu de miroir pour obtenir les différents angles de vue en n'utilisant qu'une seule caméra. Les vitesses obtenues sont de l'ordre de  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'obtention d'une lumière structurée est réalisée en projetant un motif laser (points, lignes) en surface du bain métallique. La projection de ce motif, déformé et réfléchi par la surface de bain métallique qui se comporte comme un miroir est récupérée par imagerie rapide. La *figure 2.7(a)* présente le type de dispositif mis en place pour l'utilisation de cette technique ainsi que le type de motif laser utilisé dans ce cas (*figure 2.7(b)*). Chaque point réfléchi est relié à son rayon incident et la surface est ensuite reconstruite à l'aide d'algorithmes développés par les auteurs qui leur permettent de déduire les caractéristiques du bain (profondeur, diamètre). Cette méthode ne donne néanmoins pas d'indication sur la vitesse d'écoulement en surface ou à l'intérieur.



*Figure 2.6 : Dispositif expérimental mis en place dans le cas de l'utilisation du suivi de particules pour la caractérisation des vitesses dans le bain de fusion résultant de l'interaction d'un arc d'argon de 3mm avec une anode en acier 316L sous une intensité de 80A [Zha09b]*



*Figure 2.7: (a) Dispositif expérimental mis en place dans le cas de l'utilisation d'une lumière structurée pour la reconstruction géométrique du bain de fusion sur une configuration TIG et (b) motif laser projeté [Son07]*

Peu de travaux expérimentaux sont consacrés à l'estimation des vitesses en surface du bain métallique sur une configuration TIG. La mise en place d'une méthode expérimentale non intrusive

et innovante est un point développé dans ces travaux de thèse tant pour la compréhension des phénomènes d'écoulement que pour la validation des modèles.

### **III. Étude de la surface du bain métallique**

Dans ces travaux de thèse, deux méthodes de diagnostic basées sur le suivi de l'intensité des pixels par imagerie rapide sont présentées. Dans un premier temps, la mise en œuvre expérimentale est détaillée puis le développement de ces méthodes et de leur application pour l'estimation des vitesses en surface du bain métallique sont décrites.

#### **1. Mise en œuvre expérimentale**

L'étude de la surface du bain métallique pendant la phase d'arc nécessite l'utilisation d'une caméra rapide. La caméra utilisée pour ces mesures est une caméra rapide Fastcam SA5 de chez Photron. Elle permet d'atteindre des vitesses d'acquisitions de 1000000 images par secondes. Sa cellule photosensible est une matrice composée de pixels carrés de 20 $\mu$ m de côté. Elle comporte 1024 lignes et 1024 colonnes et peut fonctionner à pleine résolution jusqu'à une vitesse de 7000 images par seconde. La matrice a une capacité de réponse sur une large plage de longueur d'onde (400 à 900nm), cependant son efficacité est maximale autour de 650nm. Un objectif macro de focale 105mm vient équiper cette caméra.

La caméra est positionnée au plus proche du bain pour avoir la meilleure définition possible. Cette distance est de l'ordre de 25cm sur la configuration à arc transféré et de 15cm sur la configuration TIG : dans le premier cas, l'enceinte contenant l'arc limite l'approche ; dans le second, un positionnement plus proche dégraderait rapidement le matériel. Les résolutions spatiales obtenues à de telles distances sont de 47 $\mu$ m (resp. 25 $\mu$ m) suivant la direction horizontale de l'image et de 100 $\mu$ m (resp. 40 $\mu$ m) suivant la direction verticale sur la configuration à arc transféré (resp. configuration TIG). Sur les deux configurations, l'enjeu est d'obtenir une image nette de la surface du bain métallique sans être gêné par la présence de l'arc. Différents tests ont été menés afin de définir les paramètres de réglage de la caméra. Les conditions suivantes sont requises pour la meilleure observation possible :

- une vitesse d'acquisition de 10000 à 15000 images par seconde. Au-delà, la taille de champ devient trop réduite et une partie du bain peut être masquée. La vitesse d'acquisition n'a cependant pas une grande influence sur l'observation des mouvements.
- un temps d'exposition réduit ( $\sim 1/2000000$  sec) pour figer au mieux les mouvements et faciliter leurs observations,
- une fermeture maximale du diaphragme de la caméra de manière à avoir une profondeur de champ optimale et donc une observation nette sur la plus grande surface possible,
- un nombre d'images enregistrées suffisant (au minimum 2000) pour pouvoir appliquer les méthodes développées et décrites au paragraphe suivant.

La fermeture maximale du diaphragme ainsi que le choix d'un faible temps d'exposition permettent d'atténuer une partie de la lumière émise par le plasma. Il faut néanmoins ajouter une densité neutre (ND8) sur l'objectif pour améliorer la visibilité en surface du bain métallique.

L'observation des mouvements en surface du liquide sur la configuration TIG nécessite l'addition d'un système d'illumination du bain pour obtenir une meilleure visualisation. Le système utilisé pour éclairer la surface du bain est une lampe halogène de puissance 1000W. Ce dernier n'a pas été nécessaire sur la configuration à arc transféré. En effet, l'enceinte contenant l'arc a tendance à agir comme système réfléchissant et à éclairer la surface du bain.

## **2. Développement d'outils pour l'estimation des vitesses en surface du bain métallique**

Jusqu'alors, la vitesse en surface du bain était mesurée en analysant le déplacement du front d'une vaguelette sur plusieurs images consécutives extraites des acquisitions par imagerie rapide. Cette méthode donnait une bonne estimation des valeurs de vitesse puisqu'elles étaient en accord avec les valeurs avancées par les modèles numériques ou le peu de travaux expérimentaux trouvés dans la littérature. Cependant, il s'agissait d'une méthode fastidieuse et très consommatrice en temps puisqu'elle était réalisée manuellement sur des acquisitions vidéo comportant environ 3000 images. Néanmoins, elle reste une méthode valable et est utilisée comme référence pour valider les deux méthodes de diagnostic développées et décrites ci-après. La première méthode utilise la différence de phase obtenue par transformée de Fourier des signaux extraits de deux pixels et a été développée à partir de travaux existant dans la littérature pour d'autres applications [Cou95][Hli96]. La seconde consiste à suivre l'évolution de l'intensité des pixels sur un segment d'image. Ces méthodes sont présentées dans les sections ci-dessous.

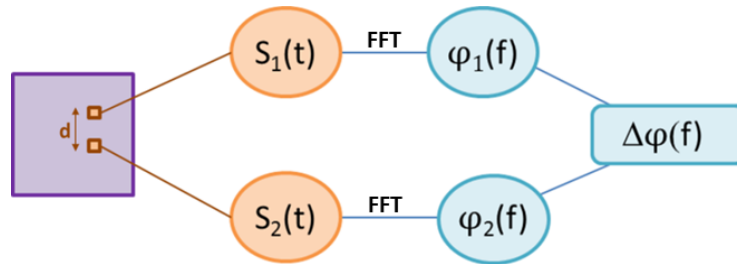
### **Méthode 1 : Différence de phase pour l'estimation des vitesses**

L'observation directe durant le procédé a mis en évidence la formation de vaguelettes en surface du bain métallique qui peuvent être assimilées à des oscillations. Dans ses travaux *J Hlina* utilise la transformée de Fourier rapide (FFT) pour évaluer la vitesse du gaz à partir des oscillations lumineuses présentes dans un jet en sortie de la buse d'une torche à plasma [Hli96]. Le rayonnement du plasma est détecté et enregistré par une barrette de photodiodes le long de l'axe du jet permettant la détection du décalage temporel entre deux diodes. Comme schématisé sur la *figure 2.8*, la méthode est basée sur la mesure de la différence de phase entre deux points séparés d'une distance  $d$  le long du jet plasma. Au moyen d'une FFT, une dépendance linéaire entre la différence de phases extraites des deux signaux ( $s_1(t)$  et  $s_2(t)$ ) et la fréquence est supposée. La pente  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta f}$  de l'arrangement linéaire de la différence des phases permet alors d'estimer la vitesse à travers :

$$v = 2\pi d \frac{\Delta f}{\Delta\varphi} \quad (1.1)$$

où  $d$  est la distance séparant les deux signaux extraits de l'acquisition,  $\Delta f$  le pas en fréquence et  $\Delta\varphi$  l'incrément de phase.

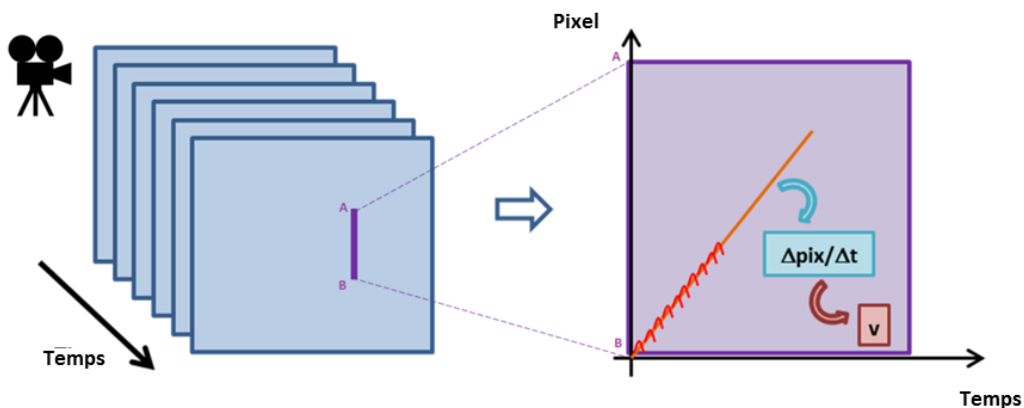
Alors qu'elle était utilisée pour les oscillations du gaz, cette méthode a été transposée aux oscillations en surface du bain métallique.



*Figure 2.8: Schéma du principe de la méthode 1 - la différence de phase est obtenue au moyen d'une FFT à partir de deux signaux temporels extraits de deux points séparés d'une distance  $d$*

### **Méthode 2: Suivi de l'intensité des pixels pour l'estimation des vitesses**

L'observation directe durant le procédé a mis en avant le déplacement de pixels de forte intensité sur la surface du bain métallique représentatif du mouvement des vaguelettes. La seconde méthode mise en place utilise cette variation d'intensité dans le temps. Comme schématisé sur la *figure 2.9*, un segment [AB] est sélectionné sur chaque image et juxtaposé de manière à obtenir une cartographie représentant l'intensité des pixels en fonction du temps. Cette représentation met en avant des maxima d'intensités caractéristiques du déplacement du front d'une vaguelette. La droite reliant les différents maxima donne accès à la vitesse de déplacement de la vaguelette avec le rapport  $\frac{\Delta pix}{\Delta t}$ .



*Figure 2.9: Schéma du principe de la méthode 2 – une carte d'intensité en fonction du temps est obtenue à partir de l'intensité des pixels composant un segment [AB] sélectionné sur chaque image*

### **3. Validation**

Les deux méthodes ont d'abord été mises en œuvre sur un cas simplifié pour les valider. Le mouvement du bain métallique a été assimilé aux oscillations générées par la chute d'une goutte d'eau dans un récipient contenant de l'eau (*figure 2.10*). Les valeurs de vitesse ont été déduites avec les deux méthodes et comparées à la valeur de « référence » obtenue par observation directe des vidéos. L'observation directe permet de suivre le front d'onde d'une vaguelette sur une succession

d'images. Une calibration permet d'obtenir une valeur de vitesse. Dans ce cas, les acquisitions ont été réalisées avec une vitesse de 10000 images par seconde et une résolution spatiale de  $100\mu\text{m}$  suivant l'axe x et de  $160\mu\text{m}$  suivant l'axe y. Les valeurs de vitesse obtenues sont de  $0.20\pm 0.06\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

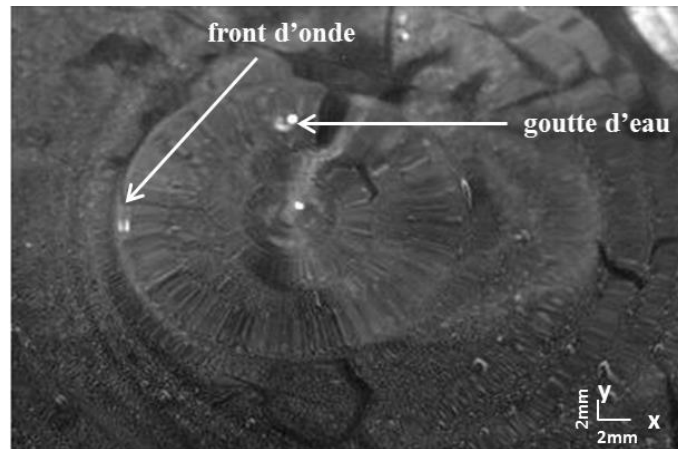


Figure 2.10 : Image extraite des acquisitions vidéo pour la visualisation du front d'onde généré par une goutte d'eau

### **Méthode 1**

L'intensité de deux signaux séparés d'une distance de deux pixels a été extraite sur la totalité des images enregistrées par caméra rapide. La figure 2.11(a) présente le type de signal obtenu lors de l'extraction de l'intensité d'un pixel sélectionné sur la totalité de l'acquisition. Dans ce cas, l'enregistrement comprend 6200 images ce qui correspond à un temps total d'acquisition de 0.62s. La figure 2.11(b) présente le spectre de Fourier en fréquence. Ce spectre est tracé jusqu'à 5000Hz qui correspond à la fréquence maximale présente dans le signal. Cette fréquence maximale est déterminée à partir de la fréquence d'échantillonnage (ici 10000 images par seconde) qui est le double de la fréquence maximale pouvant être contenue dans le signal (théorème de Shannon-Nyquist). Cette représentation indique que l'information est contenue essentiellement entre 0 et 1kHz.

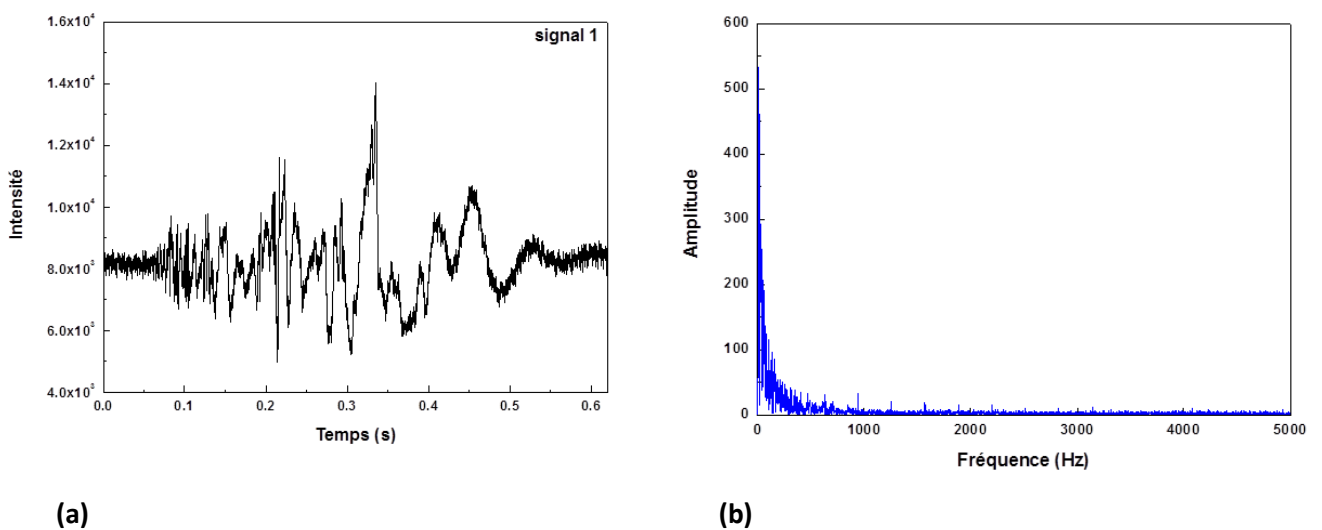
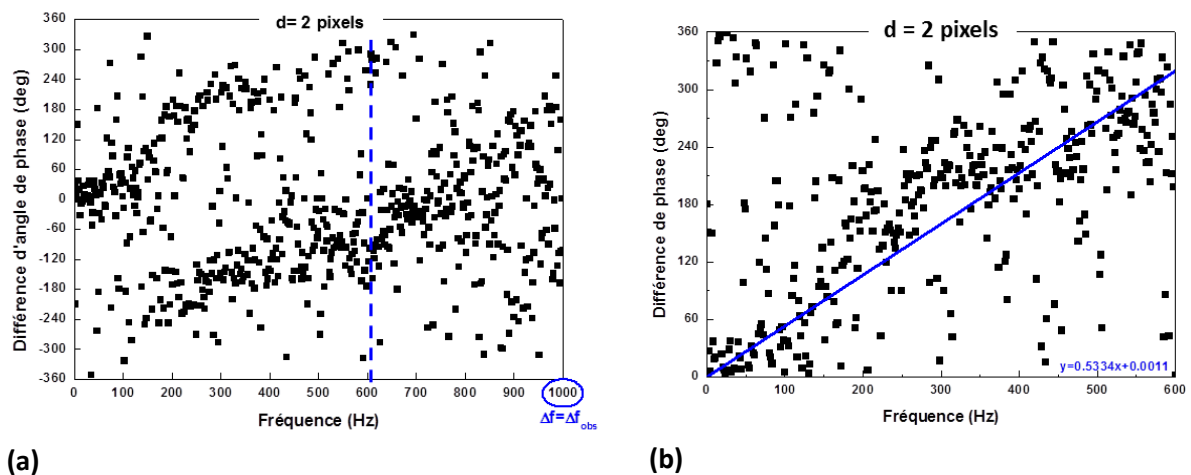


Figure 2.11: (a) signal obtenu lors de l'extraction de l'intensité d'un pixel sur la totalité de l'acquisition (b) spectre de Fourier associé

La FFT permet également d'obtenir la phase du signal. Comme ceci est réalisé pour deux pixels, donc deux signaux, la différence de phase en fonction de la fréquence peut être tracée. Sur la *figure 2.12(a)*, la différence de phase est observée sur une plage de fréquence ( $\Delta f_{obs}$ ) sur laquelle la phase est déroulée. Cette fréquence est fortement liée à la distance choisie entre les deux signaux extraits et à l'ordre de grandeur supposé des vitesses. Pour une vitesse donnée, la plage d'observation en fréquence diminue avec l'augmentation de la distance séparant les deux signaux. Cependant, l'observation de la différence de phase doit souvent être réalisée sur une plage de fréquence plus faible que  $\Delta f_{obs}$  à cause de la réduction de l'information dans les hautes fréquences remarquée dans l'analyse du spectre (*figure 2.11(b)*). C'est le cas sur la *figure 2.12(a)* où le calcul théorique prévoit une observation de la différence de phase sur une gamme de fréquences comprises entre 0 et 1kHz mais où l'information est plus claire si cette gamme de fréquence est limitée à 600Hz. Les points représentés entre 0 et -360 degrés correspondent à des sauts de phase qui sont compensés (*figure 2.12(b)*). Le rapport  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta f}$  est donné par la pente de l'arrangement linéaire de la différence de phase (représentée en bleu sur la *figure 2.12(b)*). La distance  $d$  est mesurée avec la calibration de l'image (1pixel=100 $\mu$ m) réalisée avant les acquisitions. Avec ce rapport, la vitesse estimée est de  $0.15\pm 0.03\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ce qui est en accord avec celle évaluée par la méthode directe.



*Figure 2.12 : Différence d'angle de phase en fonction de la fréquence pour deux signaux séparés d'une distance de 2 pixels (a) sur la plage de fréquence théorique calculée  $\Delta f_{obs}$  et (b) sur une plage de fréquence réduite*

Par ailleurs, un autre paramètre semble essentiel. Il a été observé que pour une trop grande distance entre les pixels considérés, la réduction de la plage de fréquence d'observation n'était plus suffisante. Il semble qu'au-delà de quelques pixels, les signaux soient moins corrélés et il devient plus difficile d'en retirer une information fiable. La *figure 2.13(a)* présente la différence de phase pour deux signaux séparés d'une distance de 6 pixels. Le calcul théorique donne une fréquence maximale d'observation à 333Hz mais il est observé que l'information est plus difficile à détecter que sur le cas précédent présenté sur la *figure 2.12*: ici (*figure 2.13(a)*), l'arrangement linéaire est supposé sur la première centaine de hertz. Si la fréquence d'observation est réduite à 100Hz (*figure 2.13(b)*) comme

expliqué précédemment, le rapport obtenu avec la pente (droite représentée en bleu sur la figure) permet de déduire une vitesse de  $0.26 \pm 0.02 \text{ m.s}^{-1}$ . Bien que la valeur obtenue soit encore proche de la valeur attendue, il semble plus prudent de choisir une distance plus faible entre les deux signaux pour avoir un plus grand nombre de points sur la plus large gamme de fréquences possible et avoir ainsi un arrangement linéaire plus évident. De plus, l'observation des signaux extraits met en avant une absence de corrélation entre eux quand la distance devient trop importante : la *figure 2.13(c)* (resp. *figure 2.13(d)*) présente l'intensité des deux signaux (en noir et rouge) séparés d'une distance de 2 pixels (resp. 6 pixels). Il est clairement observé que les signaux 1 et 2 sur la *figure 2.13(c)* présentent la même allure décalée dans le temps alors qu'un manque de corrélation est visible sur la *figure 2.13(d)*.

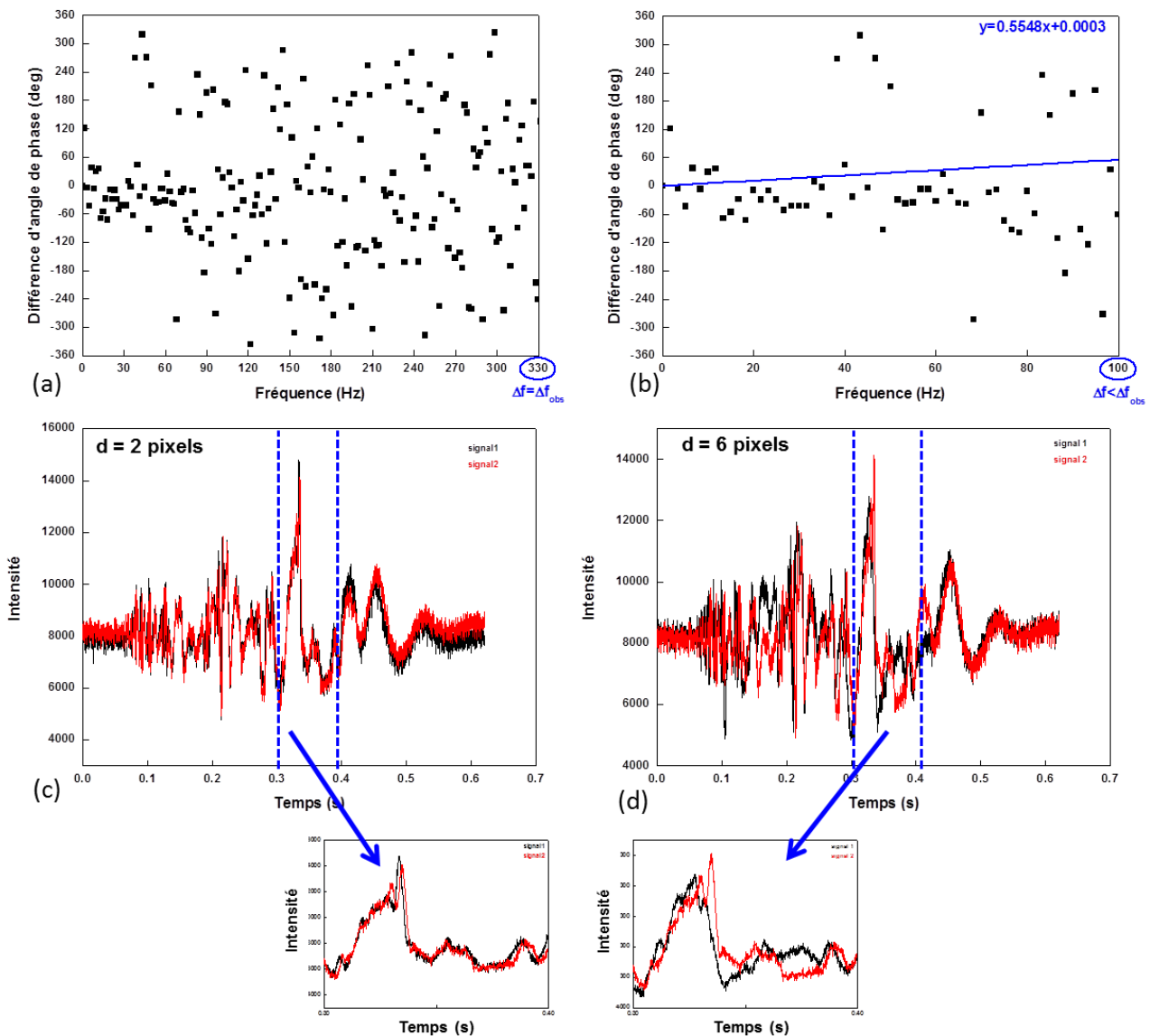


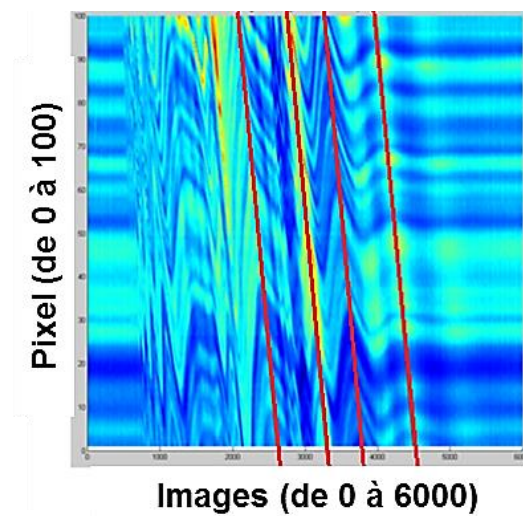
Figure 2.13: (a),(b) Différence de phase en fonction de la fréquence pour deux signaux séparés d'une distance de 6 pixels ; intensité d'un pixel en fonction du temps pour deux signaux séparés de (c) 2 pixels et (d) 6 pixels

Ces tests montrent l'importance du choix de la distance et de la fréquence d'observation pour une bonne utilisation de la méthode.



**Méthode 2:**

L'intensité d'un segment de l'image (100 pixels en longueur) a été extraite sur la totalité des images enregistrées et juxtaposées pour obtenir une carte d'intensité en fonction du temps. La carte relative au cas de la goutte d'eau est présentée à la *figure 2.14*. Le ratio  $\frac{\Delta_{pix}}{\Delta_t}$  est déduit des droites (représentées en rouge sur la figure) joignant les maxima. La distance  $d$  est ensuite estimée avec la calibration de l'image (1 pixel=100 $\mu$ m) et le nombre d'images permet d'en déduire le temps à partir de la fréquence d'images utilisée lors de l'acquisition (10000 im/s). La valeur de la vitesse est estimée à  $0.21 \pm 0.02 \text{ m.s}^{-1}$ , ce qui est également en accord avec la vitesse évaluée par la méthode directe. Par ailleurs, l'orientation des droites joignant les maxima donne une indication sur le sens de déplacement des vaguelettes. Ici, elles indiquent un déplacement du centre vers la périphérie.



*Figure 2.14: Carte d'intensité en fonction du nombre d'images et droites (en rouge) joignant les maxima utilisés pour l'estimation de la vitesse*

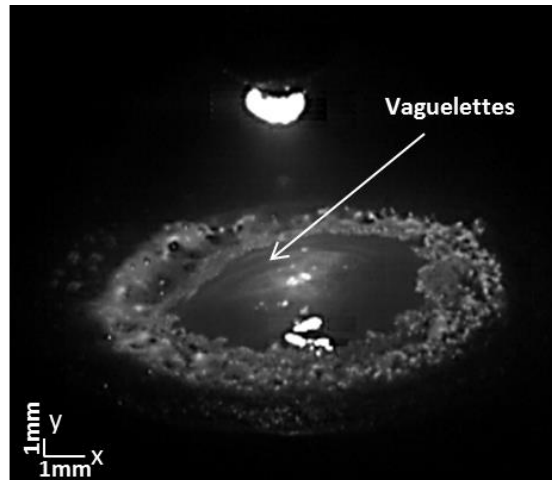
**4. Application**

Les deux méthodes présentées ci-dessus ont ensuite été appliquées aux deux configurations expérimentales décrites au *Chapitre 0*. Dans la première section les résultats obtenus sur la configuration à arc transféré sont présentés. La seconde section s'intéresse à la configuration TIG.

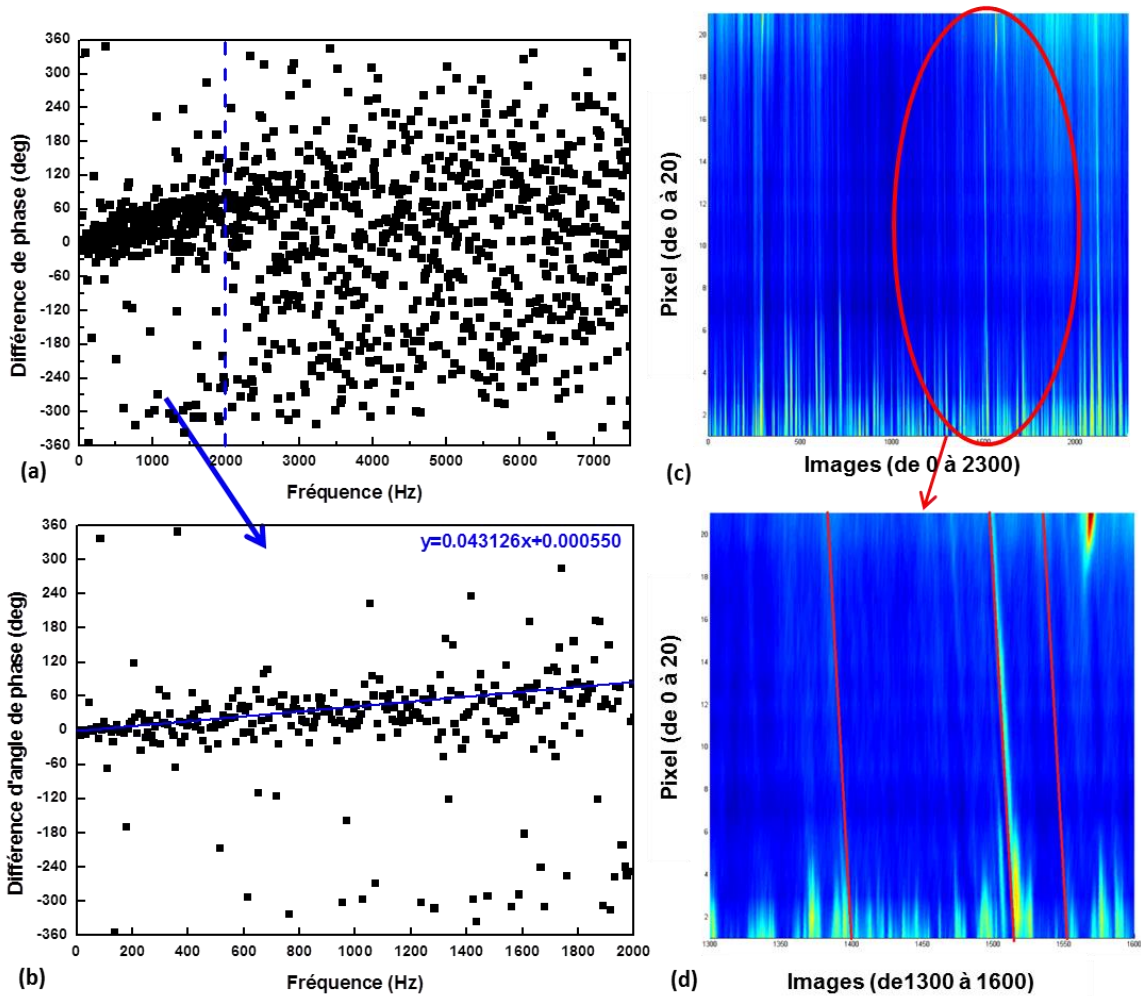
**Configuration à arc transféré**

L'arc est initié entre une cathode de tungstène thorié affûté à 60° de diamètre 6mm et une anode en acier 304L à haute teneur en soufre (300ppm) d'épaisseur 10mm. La longueur de l'arc est fixée à 5mm. L'atmosphère inerte est assurée par de l'hélium injecté à un débit de 10l/min, la transparence d'un tel milieu facilitant l'observation, et l'intensité du courant réglée à 100A. Les paramètres de la caméra rapide pour cette acquisition sont de 15000 images par seconde avec une résolution spatiale de 46 $\mu$ m par pixel suivant l'axe x et 100 $\mu$ m par pixel suivant l'axe y. Le nombre total d'images acquises à cette cadence est de 2300, soit une durée totale de 0.155ms. La *figure 2.15* présente une image extraite des acquisitions vidéo obtenues sur cette configuration. Sur cette image, la présence

des vaguelettes en surface est représentée par la flèche blanche. La *figure 2.16* présente les résultats obtenus avec les deux méthodes décrites ci-dessus.



*Figure 2.15: Image extraite des acquisitions vidéo pour la visualisation du front d'onde créé par l'interaction d'un arc d'hélium de 5mm avec une anode en acier 304L sous une intensité de 100A*



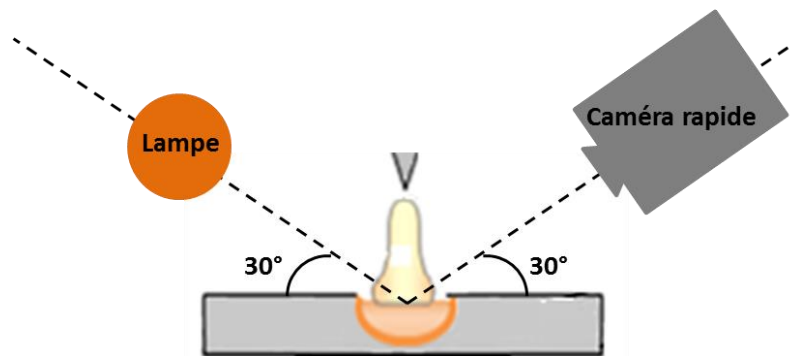
*Figure 2.16 : Applications de la (a)(b) méthode 1 et de la (c)(d) méthode 2 pour un bain métallique obtenu par l'interaction d'un arc d'hélium de 5mm avec une anode en acier 304 sous une intensité de 100A*

L'application de la *méthode 1* (*figure 2.16(a),(b)*) montre l'arrangement linéaire de la différence de phase pour les deux signaux séparés d'une distance de 2 pixels. Comme présenté sur la *figure 2.16(a)*, la plage d'observation en fréquence est réduite à 2000Hz (*figure 2.16(b)*). Ceci est réalisé en plusieurs points de l'image permettant d'obtenir une vitesse moyenne de  $0.79 \pm 0.04 \text{ m.s}^{-1}$ . L'application de la *méthode 2* donne une représentation de l'intensité des pixels en fonction du nombre d'images (*figure 2.16(c)*). Le rapport  $\frac{\Delta \text{pix}}{\Delta t}$  est mesuré à partir des droites représentées en rouge sur la *figure 2.16(d)*. Seules les images comprises entre 1300 et 1600 sont présentées ici pour faciliter l'observation mais le rapport a été calculé sur la totalité de la carte.

La vitesse estimée avec cette méthode est de  $0.71 \pm 0.09 \text{ m.s}^{-1}$ . La valeur de référence donnée par l'observation directe est  $0.70 \pm 0.10 \text{ m.s}^{-1}$ . Les premiers tests montrent un bon accord entre les deux méthodes et la valeur de « référence ». Pour se rapprocher au mieux des conditions pouvant être trouvées dans la littérature, qu'il s'agisse de travaux théoriques ou expérimentaux, les méthodes développées ont ensuite été appliquées sur la torche TIG.

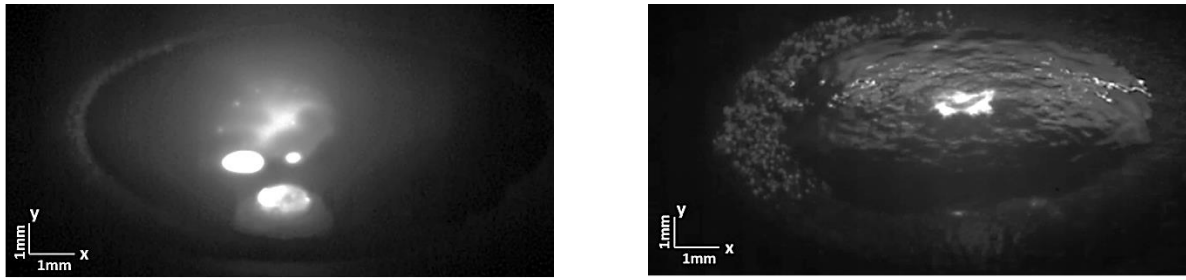
### Torche TIG

Le cas étudié est le même que celui de la configuration à arc transféré : un arc d'hélium de longueur 5mm en interaction avec une anode en acier 304L à haute teneur en soufre (300ppm) d'épaisseur 10mm. L'intensité du courant est également fixée à 100A et le débit de gaz à 10l/min. La pointe de cathode est affûtée à  $60^\circ$ . Cependant, le diamètre de la cathode est de 3.2mm. Comme cela a été évoqué au *paragraphe III.1*, l'observation des vaguelettes en surface du bain nécessite la présence d'un éclairage. La source lumineuse et la caméra rapide sont positionnées en vis-à-vis avec un angle d'incidence de  $30^\circ$  (*figure 2.17*).



*Figure 2.17 : Schéma du dispositif en présence du système d'éclairage*

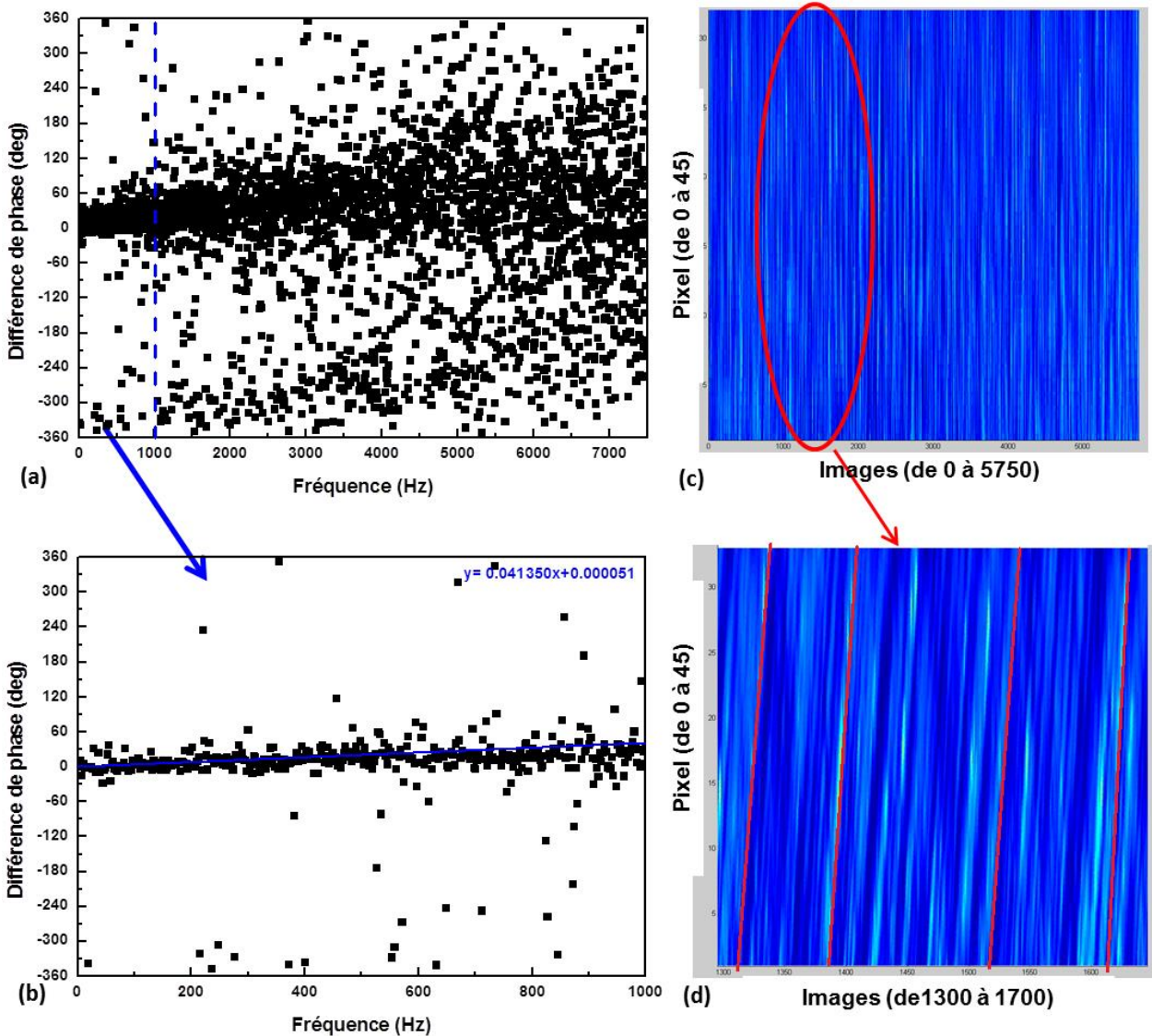
La *figure 2.18* présente une image du bain métallique avec et sans illumination. L'apport du système d'éclairage est nettement observable. Les paramètres de la caméra rapide pour ces acquisitions sont de 15000 images par seconde avec une résolution spatiale de  $27 \mu\text{m}$  par pixel suivant l'axe x et  $40 \mu\text{m}$  par pixel suivant l'axe y. Le nombre total d'images acquises à cette cadence est de 5750, soit une durée totale de 0.38ms. Les valeurs de vitesses obtenues sont le résultat d'une moyenne de trois acquisitions. À titre d'exemple, les résultats sont présentés pour une acquisition : la *figure 2.19* présente les résultats obtenus avec les deux méthodes décrites précédemment.



(a)

(b)

Figure 2.18 : Images extraites des acquisitions vidéo pour la visualisation du front d'onde créé par l'interaction d'un arc d'hélium de 5mm avec une anode en acier 304L sous une intensité de 100A (a) sans et (b) avec système d'éclairage



(a)

(c)

(b)

(d)

Figure 2.19 : Applications de la (a)(b) méthode 1 et de la (c)(d) méthode 2 pour un bain métallique obtenu par l'interaction d'un arc d'hélium de 5mm avec une anode en acier 304 sous une intensité de 100A

L'application de la *méthode 1* (figure 2.19(a),(b)) montre l'arrangement linéaire de la différence de phase pour les deux signaux séparés d'une distance de 2 pixels. Comme présenté sur la figure 2.19(a), la plage d'observation en fréquence est réduite à 1000Hz (figure 2.19(b)). Au-delà, les points deviennent plus dispersés et la précision diminue. La vitesse obtenue est de  $0.77 \pm 0.09 \text{ m.s}^{-1}$ . L'application de la *méthode 2* donne une représentation de l'intensité des pixels en fonction du nombre d'images (figure 2.19(c)). Le rapport  $\frac{\Delta \text{pix}}{\Delta t}$  est mesuré à partir des droites représentées en rouge sur la figure 2.19(d). Seules les images comprises entre 1300 et 1700 sont présentées ici pour faciliter l'observation mais le rapport a été calculé sur la totalité de la carte. La vitesse estimée avec cette méthode est de  $0.86 \pm 0.04 \text{ m.s}^{-1}$ . La valeur de référence donnée par l'observation directe est  $0.87 \pm 0.13 \text{ m.s}^{-1}$ . Le tableau 2.1 regroupe les valeurs de vitesses obtenues sur l'ensemble des acquisitions réalisées.

	Acquisition 1	Acquisition 2	Acquisition 3
Méthode 1	$0.57 \pm 0.05 \text{ m.s}^{-1}$	$0.72 \pm 0.01 \text{ m.s}^{-1}$	$0.77 \pm 0.09 \text{ m.s}^{-1}$
Méthode 2	$0.65 \pm 0.17 \text{ m.s}^{-1}$	$0.88 \pm 0.18 \text{ m.s}^{-1}$	$0.86 \pm 0.17 \text{ m.s}^{-1}$
Observation directe	$0.63 \pm 0.11 \text{ m.s}^{-1}$	$0.85 \pm 0.09 \text{ m.s}^{-1}$	$0.87 \pm 0.13 \text{ m.s}^{-1}$

Tableau 2.1 : Valeurs de vitesses des mouvements en surface d'un bain métallique d'acier 304L en interaction avec un arc d'hélium sous une intensité de 100A pour les trois acquisitions réalisées

La vitesse moyenne estimée avec la *méthode 1* est de  $0.69 \pm 0.05 \text{ m.s}^{-1}$  et celle obtenue avec la *méthode 2* est de  $0.79 \pm 0.09 \text{ m.s}^{-1}$ . L'observation directe quant à elle fournit des valeurs de vitesses de  $0.78 \pm 0.11 \text{ m.s}^{-1}$ . Les valeurs déterminées avec les trois méthodes semblent cohérentes et en accord avec celles estimées sur la configuration à arc transféré. La moyenne des vitesses obtenues avec ces trois méthodes est de  $0.75 \pm 0.08 \text{ m.s}^{-1}$ .

Les mesures ont ensuite été effectuées sur la même configuration mais sous une intensité de 150A. De la même manière que précédemment, les trois méthodes ont été appliquées pour trois acquisitions permettant d'obtenir une vitesse moyenne. Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs de vitesses obtenues pour les trois acquisitions avec les différentes méthodes.

	Acquisition 1	Acquisition 2	Acquisition 3
Méthode 1	$0.91 \pm 0.07 \text{ m.s}^{-1}$	$0.92 \pm 0.01 \text{ m.s}^{-1}$	$0.90 \pm 0.05 \text{ m.s}^{-1}$
Méthode 2	$0.98 \pm 0.18 \text{ m.s}^{-1}$	$0.99 \pm 0.16 \text{ m.s}^{-1}$	$1.00 \pm 0.18 \text{ m.s}^{-1}$
Observation directe	$1.00 \pm 0.09 \text{ m.s}^{-1}$	$0.97 \pm 0.12 \text{ m.s}^{-1}$	$0.91 \pm 0.13 \text{ m.s}^{-1}$

Tableau 2.2 : Valeurs de vitesses des mouvements en surface d'un bain métallique d'acier 304L en interaction avec un arc d'hélium sous une intensité de 150A pour les trois acquisitions réalisées

La vitesse moyenne obtenue avec la *méthode 1* est de  $0.91 \pm 0.02 \text{ m.s}^{-1}$  et celle estimée avec la *méthode 2* est de  $0.99 \pm 0.19 \text{ m.s}^{-1}$ . L'observation directe quant à elle fournit des valeurs de vitesses de  $0.96 \pm 0.11 \text{ m.s}^{-1}$ . La moyenne des vitesses obtenues avec ces trois méthodes est de  $0.95 \pm 0.10 \text{ m.s}^{-1}$ .

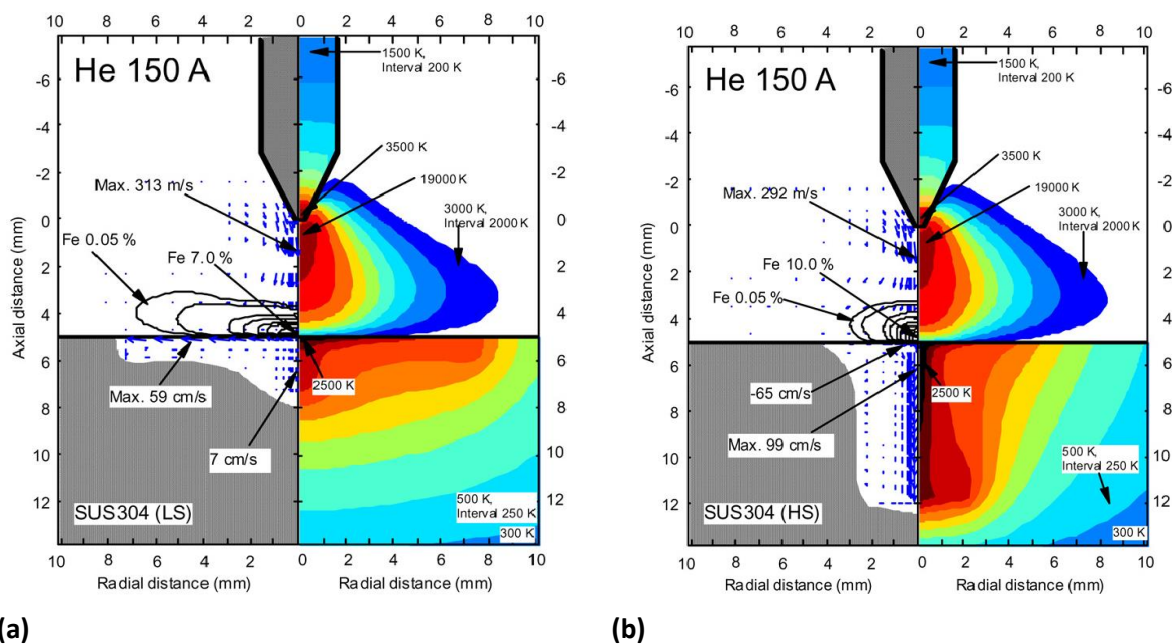


Il semble que l'augmentation de l'intensité du courant ait une influence sur les valeurs de vitesses déterminées puisqu'elles sont plus élevées. Néanmoins, pour confirmer cette tendance, de nouvelles mesures seraient nécessaires de manière à réaliser une moyenne avec un nombre de données plus important.

Les valeurs estimées sont maintenant confrontées aux résultats de la littérature et discutés.

## 5. Discussion

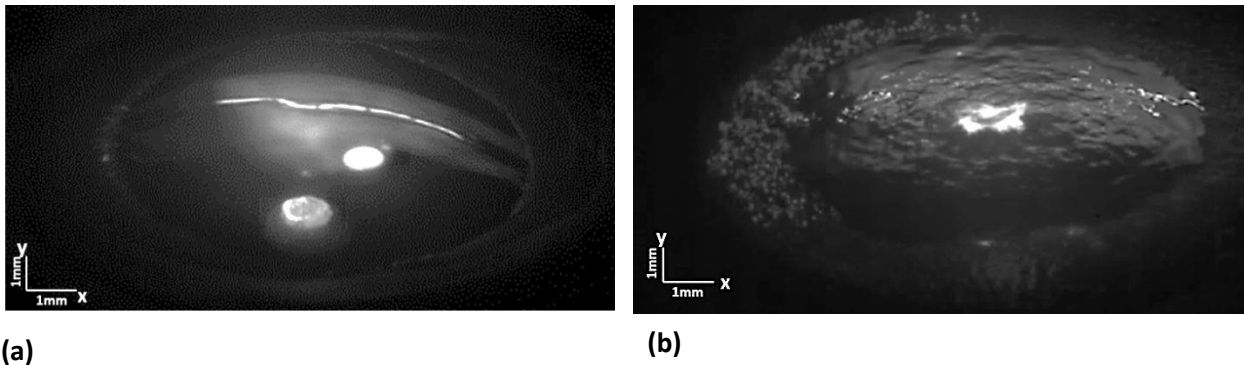
Dans cette section, les valeurs de vitesses en surface du bain métallique présentées ci-dessus sont comparées aux résultats pouvant être trouvés dans la littérature. La *figure 2.20* illustre les résultats obtenus dans le cas de la modélisation de l'interaction d'un arc d'hélium de 5mm avec un acier 304L à faible teneur en soufre (*figure 2.20(a)*) et à haute teneur en soufre (*figure 2.20(b)*) sous une intensité de 150A [Mur09][Tan10]. Les vitesses en surface du bain, observables sur la partie en bas à gauche des figures, sont estimées maximales respectivement à  $0.59\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  en périphérie du bain métallique et à  $0.65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  au centre après 20 secondes d'interaction. Des valeurs de vitesses dans le volume sont également proposées.



*Figure 2.20 Résultats obtenus par la modélisation de l'interaction d'un arc d'hélium de 5mm avec un acier 304L (a) à faible teneur en soufre [Mur09] et à (b) haute teneur en soufre après 20 secondes [Tan10]*

Comme présenté dans la *partie II*, les résultats disponibles dans la littérature (théoriques ou expérimentaux) sont variés et la disparité des conditions opératoires ne permettent pas une comparaison directe. Par conséquent, seuls les résultats de l'étude obtenus à 150A présentés au *paragraphe III.4* pourront être comparés. Dans notre étude, les valeurs de vitesses ont été estimées à  $0.90\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  en périphérie du bain. En effet, c'est le lieu de l'image où les vaguelettes apparaissent avec la meilleure définition. Les vitesses estimées par la modélisation pour un acier à haute teneur en soufre (*figure 2.20(b)*) sont, quant à elles, de l'ordre de  $0.65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  au centre du bain. L'écart constaté peut s'expliquer par cette différence de localisation. Une autre différence est à noter : le débit de gaz

utilisé dans le cas du modèle est de 30l/min, c'est-à-dire trois fois plus élevé que dans notre étude. Un tel écart dans la valeur du débit de gaz peut être à l'origine d'une modification des forces de cisaillement en surface du bain métallique et donc à une différence dans les valeurs de vitesses obtenues. Par ailleurs, certains auteurs s'accordent à dire que le temps d'interaction est un paramètre influant sur les valeurs de vitesses [Tan07][Don11]. Les résultats du modèle sont donnés après 20 secondes d'interaction alors que ceux issus de notre étude ont été réalisés après quelques minutes. En effet, il a été observé pendant les expériences que la visualisation des vaguelettes en surface du bain métallique n'était possible qu'une fois le matériau « creusé ». La figure ci-dessous présente une image en présence du système d'illumination après quelques secondes d'interaction (*figure 2.21(a)*) et après une à deux minutes (*figure 2.21(b)*). Sur la première image, la surface du bain apparaît légèrement bombée et le filament de la lampe utilisée pour éclairer la surface du bain est visible. Aucun mouvement n'apparaît. Sur la seconde image, les vaguelettes sont observables. Il semblerait que la visualisation soit facilitée par la forme convexe de la surface du bain et par les multiples réflexions que les rebords du bain font subir à la lumière incidente.



*Figure 2.21 : Images extraites des acquisitions vidéo pour la visualisation du front d'onde créé par l'interaction d'un arc d'hélium de 5mm avec une anode en acier 304L sous une intensité de 100A avec un système d'éclairage(a) après quelques secondes et (b) après une à deux minutes d'interaction*

Malgré ces différences et bien que les vitesses estimées soient plus élevées dans le cadre de notre étude, l'ordre de grandeur reste cohérent avec celui obtenu par modélisation. La comparaison reste toutefois un point délicat puisqu'à notre connaissance aucun travail n'a été réalisé dans les mêmes conditions que cette étude.

Par ailleurs, les travaux de modélisation de *J Mougnot* ont étudié l'effet de ce paramètre sur les valeurs de vitesses dans un bain métallique en interaction avec un plasma d'Arcal37 de longueur 5mm. Les vitesses maximales sont estimées à  $0.33\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  sous une intensité de 100A et de  $0.42\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  sous une intensité de 150A. L'augmentation de l'intensité du courant entraîne donc une augmentation des vitesses dans le bain métallique. Ce constat est également observé dans notre étude avec des valeurs de vitesses de l'ordre de  $0.75\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  sous une intensité de 100A et de  $0.95\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  sous une intensité de 150A. Il montre également qu'à puissance constante, le changement de la nature du gaz influe sur les valeurs de vitesses. Ainsi il obtient des valeurs de vitesses plus élevées dans le cas de l'Arcal37 ( $0.33\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) que pour un arc d'argon ( $0.29\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Cette modification s'explique par l'augmentation de la température en surface du bain lors du passage de l'Arcal37 à l'argon

entraînant une augmentation des forces de Marangoni et une diminution des forces de traînée, forces prépondérantes dans ce cas. Cela laisse penser qu'en augmentant la proportion d'hélium jusqu'à atteindre l'hélium pur, les valeurs de vitesses obtenues seront plus élevées. C'est ce qui est observé dans l'étude expérimentale présentée.

#### **IV. Conclusion**

Dans ce chapitre, deux méthodes d'estimation des vitesses en surface du bain métallique ont été présentées. La première s'appuie sur la différence de phase existante entre deux signaux séparés d'une certaine distance alors que la deuxième résulte de l'analyse du suivi d'un maximum d'intensité lumineuse. Ces deux méthodes ont été validées sur un cas simplifié puis appliquées à deux configurations : une configuration à arc transféré et une configuration de soudage TIG. L'application de ces méthodes a permis d'obtenir des vitesses moyennes en surface du bain de l'ordre de  $0.75 \pm 0.08 \text{ m.s}^{-1}$  dans le cas de l'interaction d'un arc d'hélium avec un acier 304L à haute teneur en soufre sous une intensité de 100A et de l'ordre de  $0.95 \pm 0.10 \text{ m.s}^{-1}$  sous une intensité de 150A. L'intensité du courant semble donc être un paramètre influant sur les valeurs des vitesses.

La faisabilité de ces méthodes a ainsi été montrée et elles mériteraient maintenant d'être affinées. En effet, comme cela a été évoqué, les mesures ont été réalisées après quelques minutes d'interaction, ce qui n'est pas représentatif de l'application de soudage : le système d'illumination utilisé n'est probablement pas optimal pour cette application. Pour améliorer ce point, une source monochromatique a été mise en place sur la configuration TIG. Il s'agit d'une diode laser de longueur d'onde  $685 \pm 0.10 \text{ nm}$  (CAVITAR Cavilux) pouvant fonctionner de manière pulsée à une puissance maximale de 200W. La durée du pulse est ajustable de  $10 \mu\text{s}$  à  $30 \text{ ns}$ . Ce matériel a été mis à notre disposition par la société *R&D vision* sur une durée limitée, ne permettant pas de faire les essais avec notre caméra mais avec une caméra Phantom v411. Cette caméra permet d'atteindre des vitesses d'acquisitions de 600000 images par secondes. Sa cellule photosensible est une matrice composée de pixels carrés de  $20 \mu\text{m}$  de côté. Elle comporte 1280 lignes et 800 colonnes et peut fonctionner à pleine résolution jusqu'à une vitesse de 4200 images par seconde. Un logiciel (propriété R&D vision) permet de piloter la caméra et de déclencher la diode laser lors de l'acquisition. Un filtre interférentiel de longueur d'onde  $660 \pm 66 \text{ nm}$  est placé sur un objectif 105mm permettant de sélectionner uniquement la lumière du laser réfléchi sur le bain métallique. Un problème de compatibilité des formats d'images est survenu, ne permettant pas d'enregistrer les images avec un échantillonnage en niveaux de gris suffisant. L'application des méthodes développées pour la détermination des vitesses sur ces images n'a pas été concluante : la valeur ajoutée dans l'utilisation d'une telle source reste pour l'heure difficile à déterminer puisqu'elle n'a pas été testée dans les mêmes conditions opératoires. Néanmoins, même si les vitesses n'ont pas pu être estimées, l'utilisation d'une source monochromatique semblerait être un avantage dans le cas de milieu plasma tel que l'argon ou l'Arcal. Ces milieux n'étant pas aussi transparents que l'hélium, la sélection d'une certaine gamme de longueur d'onde permettrait de s'affranchir du rayonnement du plasma et d'obtenir une meilleure observation de la surface du bain.

\*\*\*





# **CHAPITRE 3 - Étude du matériau**



Ce chapitre présente le travail réalisé autour de l'analyse du matériau d'anode après son interaction avec l'arc sur une configuration de soudage TIG. Dans un premier temps, une revue non exhaustive des travaux théoriques et expérimentaux autour de la caractérisation de la zone fondue est présentée et permet de justifier l'étude mise en place dans ces travaux de thèse. Les méthodes expérimentales développées pour cette caractérisation et les résultats obtenus dans le cas de l'interaction d'un arc d'Arcal37 de longueur 5mm avec un acier 304L sous une intensité de 100A sont ensuite détaillés et discutés. Enfin, les résultats de l'extension de cette étude à l'influence des paramètres opératoires sont présentés.

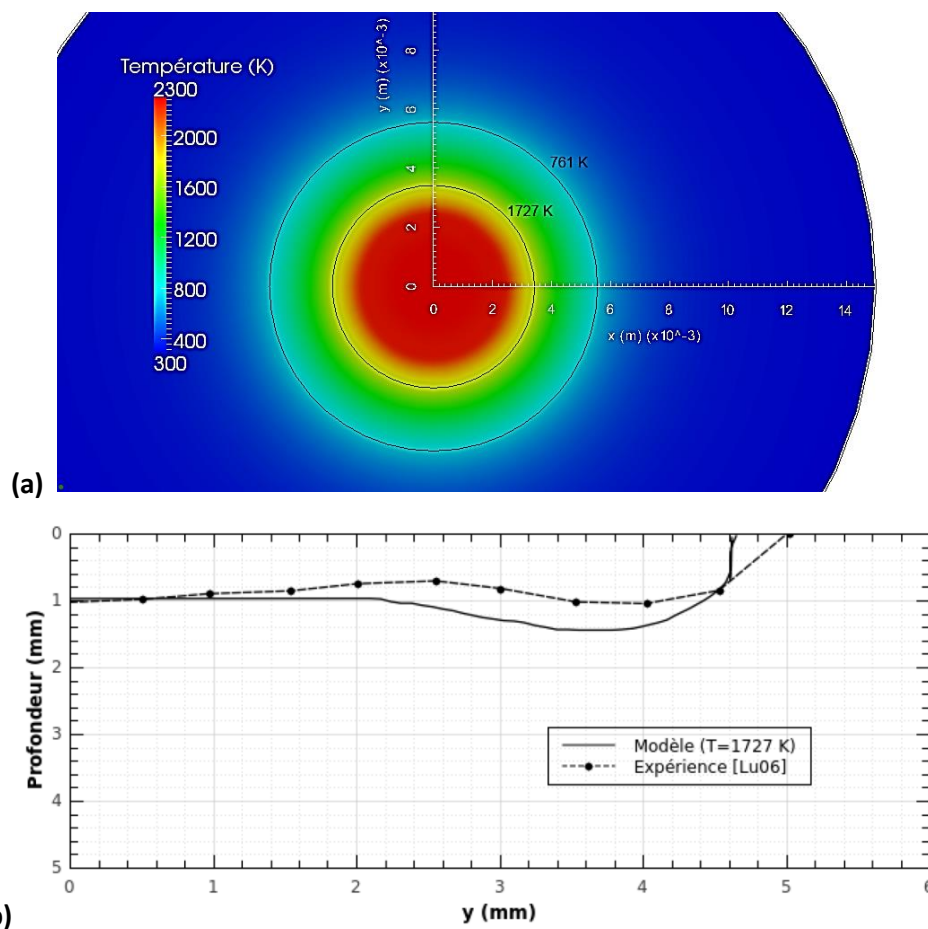
## **I. Caractérisation de la zone fondue : les travaux théoriques et expérimentaux**

Lors du processus de soudage, le transfert d'énergie entre l'arc et la pièce à souder entraîne une modification de la structure cristalline du matériau. Lors du refroidissement, le métal garde trace des contraintes qu'il a subies pendant le procédé. L'analyse de la structure interne du matériau permet de mettre en évidence les différentes zones liées au changement de phase du métal soudé (cf. *Chapitre 0*) et donc d'accéder aux grandeurs géométriques caractérisant la zone fondue : largeur, profondeur, volume. Par ailleurs, le choix des paramètres opératoires de soudage influe sur la forme finale de la soudure. Les sections ci-dessous présentent les travaux théoriques et expérimentaux relatifs à l'étude des dimensions du bain de soudure et aux effets des différents paramètres opératoires sur ces dimensions.

### **Dimensions de la zone fondue**

Dans les chapitres précédents, l'importance de l'utilisation d'un modèle couplant le plasma et le matériau ainsi que la prise en compte de la dynamique du bain de soudure et des vapeurs métalliques pour une bonne description de la morphologie de la soudure a été mise en avant. Ce type de modèle est donc capable de décrire les phénomènes de brassage dans le bain et également d'obtenir les caractéristiques des soudures qui en résultent. La *figure 3.1(a)* présente une vue de dessus de la zone fondue résultant de l'interaction d'un arc d'argon de longueur 5mm avec un acier 304 (200ppm de soufre) sous une intensité de 150A [Mou13-a]. L'isotherme 1727K représente le front de fusion de l'acier 304 et l'isotherme 761K est supposée indiquer le début de la zone affectée thermiquement (ZAT). L'isotherme 1727K permet de déduire le diamètre correspondant au bain liquide. Le diamètre obtenu dans ce cas est de 6.88mm après 1 seconde d'interaction. Il est également représenté sur cette figure une vue en coupe (*figure 3.1(b)*) permettant d'estimer, avec cette même isotherme, les dimensions de la zone fondue lors de l'interaction d'un arc d'argon de longueur 5mm avec un acier 304 (200ppm de soufre) sous une intensité de 200A [Mou13-a]. Le diamètre obtenu dans ce cas est de 9.2mm et la profondeur de pénétration du bain est de 1mm au centre et de 1.44mm en périphérie après 2 secondes d'interaction. Il est intéressant de noter l'influence de l'intensité sur la valeur des diamètres de bain et l'impact du temps d'interaction sur cette grandeur.

Certaines études s'intéressent en effet à l'influence du temps d'interaction sur les profils de bains. Les travaux de *M Dal et al.* [Dal14] concernent l'estimation de l'avancée du front de fusion par l'utilisation d'une méthode inverse dans le cas de l'interaction d'un arc d'argon de longueur 1.2mm un acier 316L sous une intensité de 150A à 9 et 20 secondes. Cette méthode nécessite un certain nombre de paramètres d'entrée obtenus expérimentalement : la température mesurée en différents points du matériau à l'aide de thermocouples introduits dans l'échantillon, l'évolution du front de fusion en surface du matériau par imagerie rapide et la forme du front de fusion dans le matériau à l'instant final par la réalisation de coupes macrographiques. Ce type de coupe est utilisé dans de nombreux travaux expérimentaux dès qu'il s'agit d'étudier les dimensions de la zone fondue. Sa mise en œuvre sera détaillée par la suite (*paragraphe II.1*) puisqu'elle fait partie des techniques employées dans ces travaux de thèse.



*Figure 3.1 : Exemple de résultats de dimensions de la zone fondue obtenues par modélisation numérique dans le cas de l'interaction d'un arc d'argon de longueur 5mm avec un acier 304 à haute teneur en soufre (200ppm) (a) sous une intensité de 150A après 1 seconde d'interaction, vue de dessus (b) sous une intensité de 200A après 2 secondes d'interaction, vue en coupe [Mou13-a]*

### **Influence des paramètres opératoires**

L'effet des paramètres opératoires sur la forme de la zone fondue ainsi que sur l'énergie transmise à la pièce font l'objet de nombreux travaux dans la littérature. L'énergie transmise à la pièce peut être déterminée expérimentalement par l'estimation de la densité de flux de chaleur en

surface de l'anode à partir de mesures calorimétriques effectuées durant le procédé. Les résultats théoriques et expérimentaux trouvés dans la littérature concernant les effets des paramètres opératoires sur l'allure de la zone fondue sont synthétisés ci-dessous. Cette synthèse n'est pas exhaustive et se limite aux paramètres qui seront étudiés dans le *paragraphe II.3* et qui serviront de base pour la discussion.

- intensité du courant : les auteurs s'accordent à dire que l'augmentation de l'intensité du courant entraîne une augmentation de la densité de flux de chaleur à l'anode et provoque un étalement radial de cette dernière plus important. Cependant, un écart dans les comportements est observé : l'augmentation de la densité de flux de chaleur à l'anode en fonction de l'intensité du courant sur une gamme de courants allant de 100A à 300A apparaît linéaire dans certains travaux [Tsa85] alors qu'elle semble stagner dans d'autres [Nes62]. Il est possible que la disparité des autres paramètres opératoires utilisés (longueur d'arc, angle d'affutage de l'électrode) soit à l'origine de ces différences. En ce qui concerne son effet sur la forme du bain, il est difficile de dégager un comportement précis. En effet, l'augmentation de l'intensité du courant modifie le rapport des forces s'exerçant dans le bain et en surface et affecte la forme du bain obtenue de manière parfois peu intuitive selon le choix des autres paramètres opératoires [Bro09].
- longueur de l'arc : l'augmentation de la longueur de l'arc provoque une élévation de la puissance totale à travers l'augmentation de la tension d'arc mais influe peu sur l'énergie transmise à la pièce : il est observé une diminution du maximum de la densité de flux de chaleur transmise à la pièce mais un étalement radial plus important [Tsa85]. Par ailleurs, l'allongement de l'arc induit une vitesse dans le plasma plus élevée conduisant à une augmentation des forces de cisaillement. Il semblerait que les effets de cette force deviennent prédominants devant les autres pour des arcs longs (>8mm). A l'inverse pour des arcs courts (<3mm), la pénétration deviendrait plus importante [Bro09].
- nature du gaz : le changement de la nature du gaz modifie la tension d'arc et donc la puissance totale appliquée. L'utilisation d'argon enrichi en hélium, en hydrogène ou en oxygène provoque une augmentation du maximum de la densité de flux de chaleur à l'anode tout en conservant un étalement radial similaire impliquant une énergie transmise à la pièce plus importante [Mur10]. De plus, le passage de l'argon à l'hélium a montré une influence notable sur les pénétrations [Tan07][Tan08].
- angle d'affutage de la cathode : l'angle d'affutage est décrit comme l'angle d'ouverture totale du cône défini par la pointe. L'augmentation de l'angle de l'affutage de la cathode conduit à une diminution de la tension d'arc et donc de la puissance totale. Pour une longueur d'arc donnée, l'augmentation de l'angle conduirait à une diminution du maximum

de densité de flux de chaleur en surface de la pièce et à un étalement plus important impliquant donc une faible modification de l'énergie transmise [Tsa85]. Par ailleurs, le maximum de densité de flux de chaleur à la pièce serait maximal pour un angle d'affutage de 60° et serait d'autant plus marqué que l'arc est court (~2mm) [Goo98]. En ce qui concerne ses effets sur la forme du bain, certains auteurs mettent en avant une perte de pénétration avec une augmentation de l'angle d'affutage alors que d'autres n'y voient pas d'effet [Per00].

L'analyse des travaux de la littérature montre l'intérêt porté à ce type d'étude. En effet, la compréhension de l'influence des paramètres opératoires sur la forme de la zone fondue est un point qui semble essentiel dans l'optimisation d'un procédé (obtention de la soudure souhaitée, gain de productivité..). Cependant, la disparité des conditions opératoires trouvées et leur interdépendance conduisent parfois à des résultats contradictoires lors de l'analyse des travaux de la littérature. Les études présentées ci-après proposent d'analyser le comportement de la zone fondue en fonction du temps d'interaction puis l'effet de ces quatre paramètres opératoires.

## **II. Étude temporelle de la zone fondue**

L'objectif de cette étude est d'observer l'évolution de la zone fondue en fonction du temps d'interaction (de 1 à 20 secondes par pas de 4 secondes). Dans un premier temps, la mise en œuvre expérimentale est décrite. Le traitement des informations obtenues pour un jeu de paramètres est ensuite détaillé et les résultats obtenus sont présentés et discutés.

### **1. Mise en œuvre expérimentale**

Différents points sont analysés :

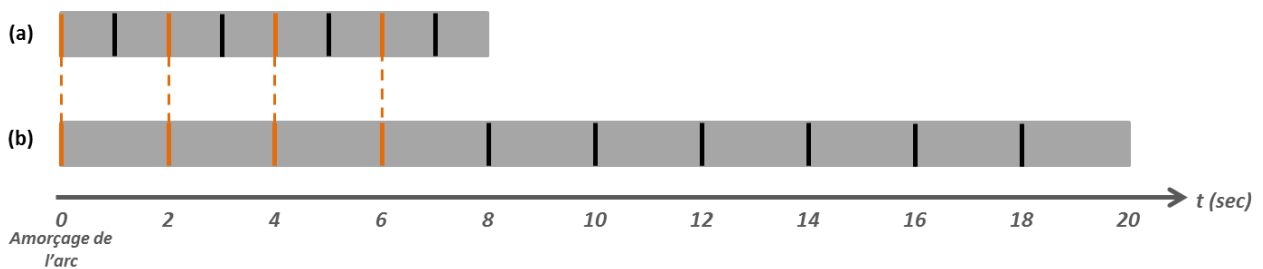
- l'évolution du diamètre du bain métallique pendant la phase d'arc,
- l'observation des dimensions en surface de la zone fondue à l'instant final,
- l'obtention des dimensions internes de la zone fondue (diamètre et profondeur) à l'instant final.

Les sections ci-dessous présentent les moyens d'études mis en place pour accéder à ces informations.

#### **Expansion du bain métallique**

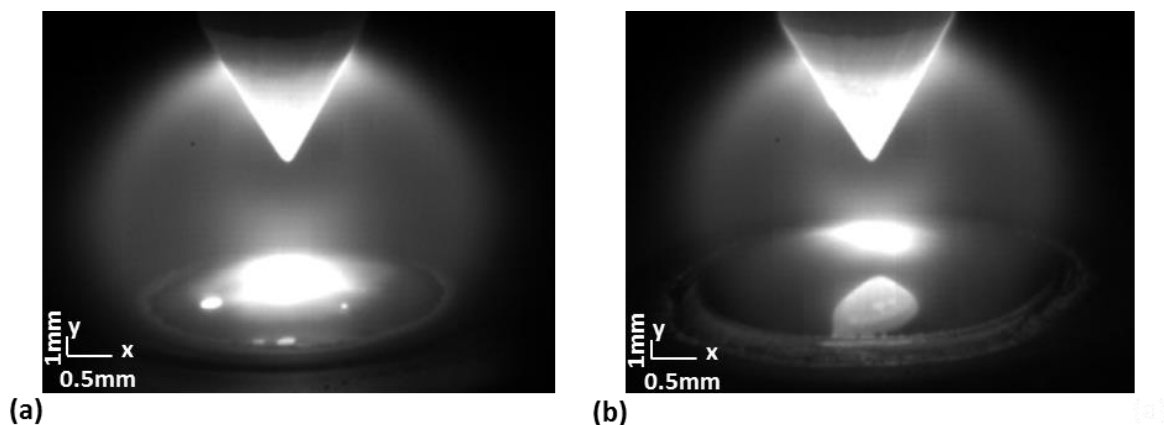
L'observation de l'expansion du bain métallique est réalisée par imagerie rapide. La caméra rapide effectue des paquets d'environ 5000 images à intervalles réguliers durant la totalité de l'interaction. Ces séries d'images sont réalisées au travers d'un système permettant de déclencher les acquisitions à des intervalles prédéfinis durant le temps souhaité. Le temps « zéro » est synchronisé avec l'amorçage de l'arc. Les intervalles d'acquisitions dépendent du temps total de l'interaction : pour des temps inférieurs ou égaux à 8 secondes, les paquets d'images sont réalisés toutes les secondes alors que pour des temps supérieurs, ils sont effectués toutes les deux secondes, l'espace mémoire de la caméra ne permettant pas de faire plus de dix groupements d'images. Ce

système d'acquisitions multiples durant la totalité d'une expérience permet d'obtenir des informations tout au long de la phase d'arc. Les informations sont donc connues à des instants communs à plusieurs expériences, permettant ainsi de réaliser une statistique sur l'évolution du diamètre du bain. Par exemple, pour deux expériences menées sur 8 et 20 secondes, l'information sera connue dans les deux cas à {0 ; 2 ; 4 ; 6 secondes}. La *figure 3.2* présente le principe d'acquisition des images. La *figure 3.2(a)* schématise (zone grisée) une acquisition sur un temps total de 8 secondes et la *figure 3.2(b)* une acquisition sur un temps total de 20 secondes. Les traits verticaux matérialisent les paquets d'images réalisées par la caméra rapide avec les intervalles définis pour ces deux temps d'interaction : en orange ceux symbolisant les temps d'acquisition communs aux deux expériences et en noir ceux propres à chacune.



*Figure 3.2 : Principe d'acquisition des images par paquet sur (a) 8 secondes et (b) 20 secondes*

Les paramètres de réglage de la caméra rapide sont les mêmes que ceux décrits au *Chapitre 2*. Seul le temps d'exposition est choisi plus élevé (1/20000 sec). En effet, l'objectif dans ce cas est d'observer les contours du bain : ces derniers peuvent être masqués si le temps d'exposition choisi est trop faible alors qu'une saturation due à la lumière de l'arc au centre du bain n'est pas gênante. À titre d'exemple, la *figure 3.3* présente deux images du bain métallique pendant la phase d'arc issue d'une même expérience ( $t_{total} = 20$  secondes) à deux instants différents (1 et 18 secondes) dans le cas de l'interaction d'un arc d'hélium de longueur 3mm avec un acier 304L sous une intensité de 100A.



*Figure 3.3 : Images du bain métallique pendant la phase d'arc issues d'une même expérience ( $t_{total} = 20$  secondes) dans le cas de l'interaction d'un arc d'hélium de longueur 3mm avec un acier 304L sous une intensité de 100A à deux instants différents (a) 1 seconde et (b) 18 secondes*

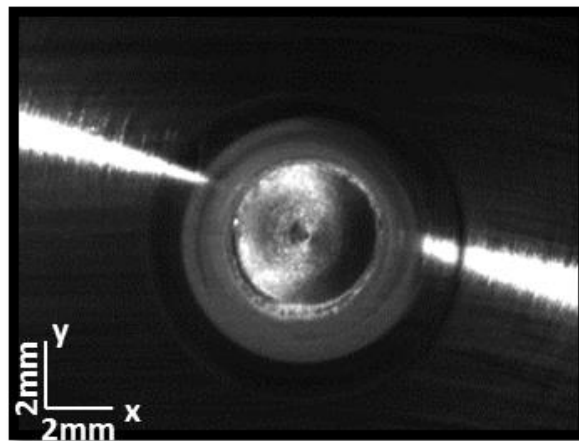


Pour chaque série d'images, le diamètre du bain est évalué systématiquement suivant l'axe x et si la prise de vue le permet suivant l'axe y à partir d'images étalons donnant respectivement une résolution de  $21\mu\text{m}$  par pixel et de  $100\mu\text{m}$  par pixel. A titre d'indication, les diamètres mesurés sur la *figure 3.3* sont de  $5.10\pm 0.11\text{mm}$  après une seconde d'interaction et de  $6.93\pm 0.11\text{mm}$  après 18 secondes.

Le système d'acquisition par série d'images à intervalles réguliers présenté dans cette section n'a pas été paramétré pour obtenir un paquet d'images à l'instant final. Cette information peut néanmoins être obtenue par observation de la surface de l'électrode ou par découpe de l'échantillon. Ces deux méthodes sont décrites dans les sections suivantes.

#### **Observation de la surface de la zone fondue à l'instant final**

Cette première méthode donne accès rapidement à l'information et ne nécessite pas de préparation de l'échantillon. L'obtention du diamètre final des bains est réalisée par observation photographique. La figure ci-dessous présente le cliché d'une électrode d'acier 304L ayant interagi durant 4 secondes avec un arc d'hélium de longueur 3mm sous une intensité de 100A. Le diamètre moyen du bain est évalué à partir des mesures déterminées suivant l'axe x et l'axe y à partir d'images étalons donnant une résolution de  $80\mu\text{m}$  par pixel pour cette acquisition. Le diamètre moyen obtenu dans ce cas est de  $5.65\pm 0.38\text{mm}$ . Sur la *figure 3.4*, un certain nombre de couronnes autour du cratère central sont observables. Le cratère correspond à la surface maximale de la zone fondue. Ne disposant pas de mesures de température pendant les expériences, il est difficile de déterminer quelle couronne pourrait marquer le début de la ZAT.



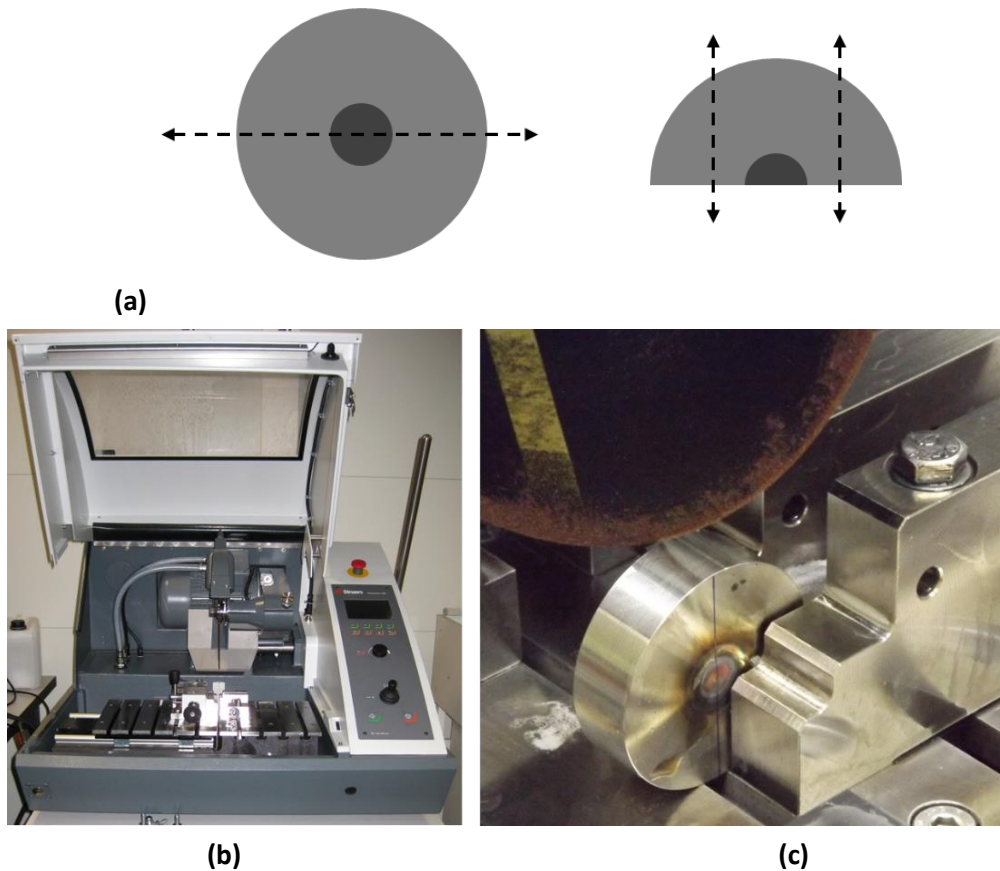
*Figure 3.4 : Photographie d'une électrode d'acier 304L après interaction de 4 secondes avec un arc d'hélium de longueur 3mm sous une intensité de 100A*

#### **Métallographie**

Cette seconde méthode donne accès aux caractéristiques internes (diamètre et profondeur) de la zone fondue. La métallographie se définit comme une technique permettant de déterminer la structure d'un métal par microscopie optique. L'examen de ces surfaces permet de mettre en avant des hétérogénéités de structure dans le métal. Dans le cadre de cette étude, il s'agit d'observer la différence de structure entre le métal qui a fondu et le métal de base de manière à obtenir les

dimensions de la zone fondue. L'observation de la microstructure nécessite une préparation des échantillons en plusieurs étapes : la découpe des échantillons, leur encapsulation, un polissage de la surface à observer et une attaque chimique.

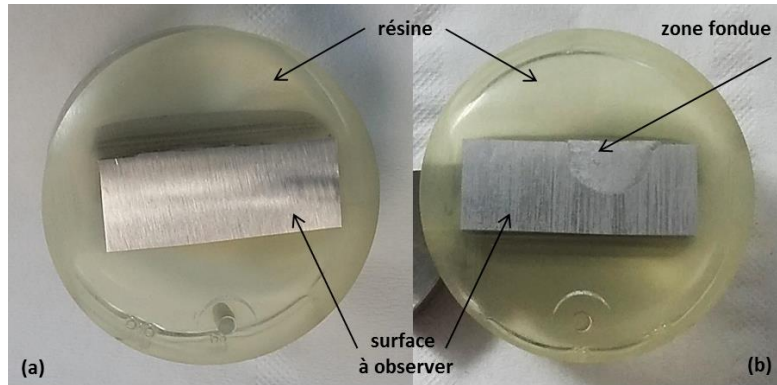
Dans un premier temps, les électrodes sont découpées en deux par le milieu puis coupées à nouveau de manière à entrer dans les moules d'encapsulation. Le principe de la découpe est schématisé sur la *figure 3.5(a)* où les flèches en pointillés représentent les axes de coupes. Sur la *figure 3.5* sont également présentées deux images de la tronçonneuse utilisée : la photographie de gauche (*figure 3.5(b)*) présente la machine dans son ensemble et la photographie de droite (*figure 3.5(c)*) montre le positionnement de l'échantillon avant la première découpe.



*Figure 3.5 : Principe de la découpe des échantillons (a) schéma des différentes coupes réalisées pour un échantillon (b) photographie de la tronçonneuse (c) photographie du positionnement de l'échantillon lors de la première coupe*

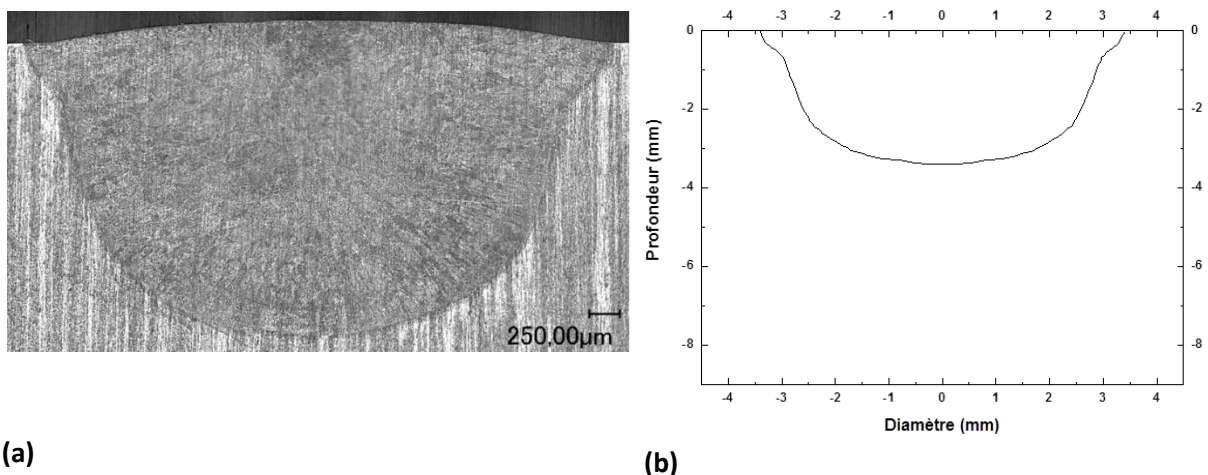
L'étape suivante, l'encapsulation, consiste à couler les échantillons dans une résine. Cette dernière facilite le maniement des échantillons et permet de les conserver bien plans lors du polissage. Un mélange de résine époxy et d'un fixateur est coulé sous vide sur l'échantillon placé dans un moule circulaire. Le tout est ensuite placé dans une étuve à 40°C pendant au minimum 12 heures. Une fois démoulés, les échantillons sont polis. Le polissage commence par l'utilisation de gros abrasifs (200 $\mu$ m). La taille des abrasifs est peu à peu diminuée jusqu'à l'emploi de poudre diamantée de 1 $\mu$ m. Une fois l'étape de polissage réalisée, la microstructure est révélée par attaque chimique. Cette attaque permet de dissoudre les couches d'oxydes naturels formées en surface du

matériau et de faire apparaître un contraste entre les phases du métal. Pour cela, l'échantillon est placé durant 45 secondes dans une solution de perchlorure de fer portée à 45°C puis est rincé à l'eau désionisée jusqu'à effacer toute trace de cet acide. La *figure 3.6* présente un échantillon avant (à gauche) et après (à droite) attaque chimique. La zone fondue est visible à l'œil nu.



*Figure 3.6 : Exemple d'un échantillon poli (a) avant et (b) après attaque chimique*

Les échantillons sont ensuite observés au microscope numérique *Keyence*. La taille des échantillons est grande comparée à la taille de champ du microscope mais ce dernier permet de reconstituer une image à partir de plusieurs prises de vue (*image stitching*). Ainsi, l'échantillon est parcouru de gauche à droite et de haut en bas et une image du type de celle présentée sur la *figure 3.7(a)* est obtenue dans le cas de l'interaction d'un arc d'Arcal37 de longueur 3mm sous une intensité de 100A après 16 secondes. Le grossissement utilisé est de 100. Le changement de structure entre le métal de base et la zone fondue est nettement visible. Les dimensions de cette zone (diamètre et profondeur) sont ensuite déterminées en utilisant les outils de mesures du microscope. Un outil permet également de réaliser les contours de la zone fondue sur l'image. L'utilisation du logiciel *Engauge* affecte ensuite des coordonnées à chaque point de l'image. Le contour de la zone fondue est ainsi tracé sur un graphe comme cela est présenté sur la *figure 3.7(b)*.



*Figure 3.7 : (a) Image obtenue par observation au microscope numérique (b) profil de la zone fondue après traitement de l'image*

Pour cet échantillon, le diamètre est de  $6.80 \pm 0.02$  mm et la profondeur de  $3.25 \pm 0.02$  mm.

Les différentes méthodes mises en place pour cette étude temporelle ont été présentées. Le traitement de ces données est maintenant détaillé.

## 2. Détail d'un cas

Ce paragraphe s'intéresse aux résultats obtenus pour un jeu de paramètres. Dans un premier temps, le traitement de données résultant des mesures présentées dans le paragraphe précédent est exposé. Dans une seconde partie, les résultats obtenus sont discutés et comparés aux travaux de la littérature.

### Traitement des données

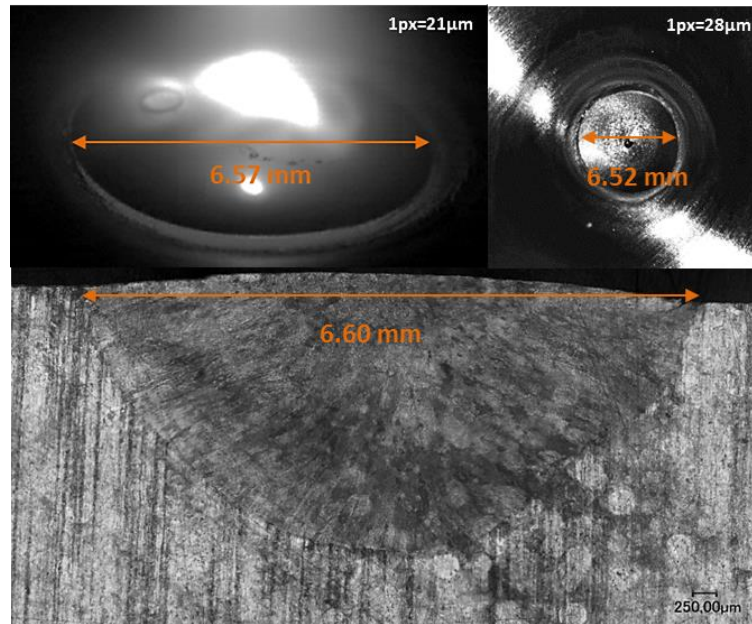
L'analyse des résultats obtenus dans le cas de l'interaction d'un arc d'Arcal37 de longueur 5mm sous une intensité de 100A est détaillée. L'angle d'affûtage de la cathode est choisi à 30°. Les mesures sont réalisées pour six temps d'interaction notés  $t_f$  {1 ;4 ;8 ;12 ;16 ;20 secondes}. Les informations obtenues par les différentes méthodes décrites au paragraphe précédent sont :

- des mesures d'expansion du bain par pas de 1 ou 2 secondes selon les cas;
- des mesures du diamètre de la zone fondue à l'instant final;
- des mesures du diamètre et de la profondeur de la zone fondue ainsi que les profils associés à l'instant final.

La *figure 3.8* regroupe les images obtenues par les trois méthodes dans le cas d'une interaction de 8 secondes :

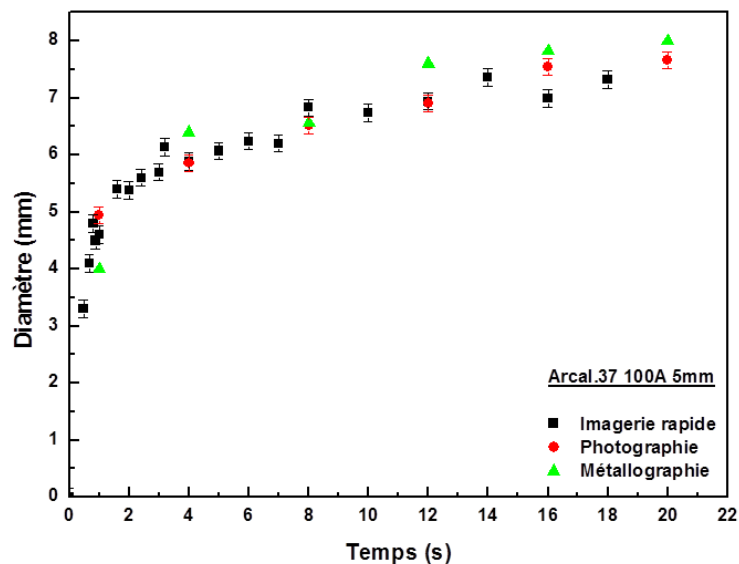
- en haut à gauche une image extraite des vidéos rapides réalisées pendant la phase d'arc. Le diamètre mesuré sur cette image est de  $6.57 \pm 0.15$ mm. Cependant, le diamètre résultant de la statistique sur toutes les mesures réalisées à 8 secondes est de  $6.83 \pm 0.20$ mm.
- en haut à droite la photographie de la surface de l'électrode après interaction. Le diamètre mesuré est de  $6.52 \pm 0.15$ mm.
- en bas l'observation microscopique. Le diamètre mesuré est de  $6.60 \pm 0.02$ mm et la profondeur de  $3.22 \pm 0.02$ mm.

Les incertitudes ont été estimées pour chaque méthode en évaluant l'erreur liée à l'observation ( $\pm 5$  pixels) à partir de la résolution des images. L'erreur est comprise entre 0.11 et 0.20mm pour les mesures réalisées à partir des acquisitions par imagerie rapide et entre 0.15 et 0.40mm pour celles réalisées à partir des photographies. Les barres d'erreurs représentées sur les graphes peuvent donc varier d'un cas à un autre. Celles relatives à l'observation microscopique sont faibles (20 $\mu$ m) et ne sont pas visibles sur les graphes qui seront présentés par la suite. Bien que les mesures réalisées au microscope semblent être celles où la source d'erreur est la plus faible, ces mesures doivent être prises avec précaution. En effet, une source d'erreur difficilement quantifiable intervient dans les valeurs des diamètres et profondeurs mesurées : celle liée à la découpe des échantillons (centrage de la découpe, perte de matière...).



*Figure 3.8 : Images obtenues par imagerie rapide, photographie et métallographie dans le cas de l'interaction d'un arc d'Arcal37 de longueur 5mm sous une intensité de 100A après 8 secondes*

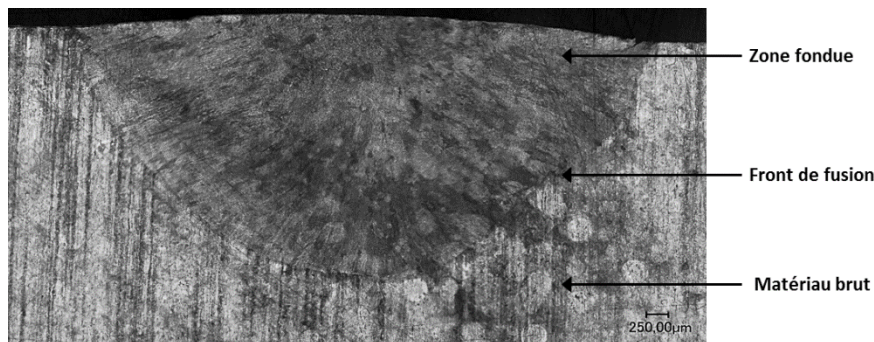
La mesure des diamètres du bain sur les vidéos pour chaque temps d'interaction  $t_i$  a permis de retracer l'évolution du diamètre de la zone fondue en fonction du temps (figure 3.9). Sur ce graphe sont aussi tracés les points obtenus aux instants finaux par photographie de la surface et par métallographie, permettant ainsi de constater la cohérence et la reproductibilité de cette évolution.



*Figure 3.9 : Evolution du diamètre du bain en fonction du temps*

Les résultats obtenus par métallographie fournissent des valeurs un peu plus élevées sur les derniers instants que ceux obtenus par les autres méthodes. Cette surestimation est probablement due à l'existence du début d'une zone critique pour laquelle la structure du matériau a pu être modifiée par l'interaction avec l'arc sous l'effet de la chaleur mais qui n'a pas fondu (ZAT). Dans cette zone, une modification progressive du grain devrait être observée. Cependant, cette distinction n'est

pas décelable lors de l'observation au microscope. La méthode d'attaque chimique utilisée n'est peut-être pas adaptée pour visualiser un tel changement de structure ou la résolution offerte par le microscope est insuffisante. Toutefois, dans cette étude, il sera considéré que la zone observée est représentative de la zone fondue et que la limite apparaissant sur les coupes microscopiques correspondent au front de fusion. À titre d'exemple, la *figure 3.10* illustre ce changement d'état. L'écart constaté entre les valeurs est néanmoins considéré comme acceptable puisqu'il est au maximum de 0.80mm et qu'il ne modifie pas la tendance : le diamètre du bain augmente rapidement sur les premiers instants (jusqu'à 1 seconde) puis ralentit et semble se stabiliser autour de 7.50mm après 12 secondes.



*Figure 3.10 : Observation au microscope numérique des différentes phases du métal après 8 secondes d'interaction (grossissement 100)*

Le transfert d'énergie entre le plasma et le matériau résulte de la combinaison de différents flux :

- le flux électrique constitué de l'énergie gagnée par les électrons lors de leur traversée de la gaine anodique et de l'énergie qu'ils restituent lors de leur intégration au matériau (travail de sortie),
- le flux par conduction provenant du plasma vers le matériau,
- le flux évaporé,
- le flux rayonné par le plasma et perdu par le matériau.

Parmi les composantes du flux appliqué à l'anode décrites ci-dessus, l'expansion du bain métallique résulte de deux contributions : la part électrique et la part par conduction. L'avancée du front de fusion par conduction est directement liée à la diffusivité du matériau, elle-même liée à la conductivité thermique et à la chaleur spécifique du matériau. Sa variation en fonction de la température est représentée sur la *figure 3.11*. Cette dernière est minimale pour une température de 1740K. L'avancée du front de fusion est donc limitée par l'isotherme 1740K. La diffusivité a été calculée pour cette isotherme en fonction du temps permettant de constater qu'après 1 seconde, le diamètre du bain qui résulterait uniquement de l'effet de conduction serait de 2.40mm. Par ailleurs, la *figure 3.12(a)* représente la densité de courant en surface du bain métallique pour une configuration identique à celle utilisée (Arcal37, intensité de 100A, longueur d'arc de 5mm) issue des données de modélisation. Elle indique un rayon d'accrochage de 2mm soit un diamètre de 4mm. Le



profil de la zone fondue tracé à partir de l'observation au microscope après 1 seconde d'interaction est présenté sur la *figure 3.12(b)*. Le diamètre obtenu dans ce cas est de  $4.00 \pm 0.02 \text{ mm}$ .

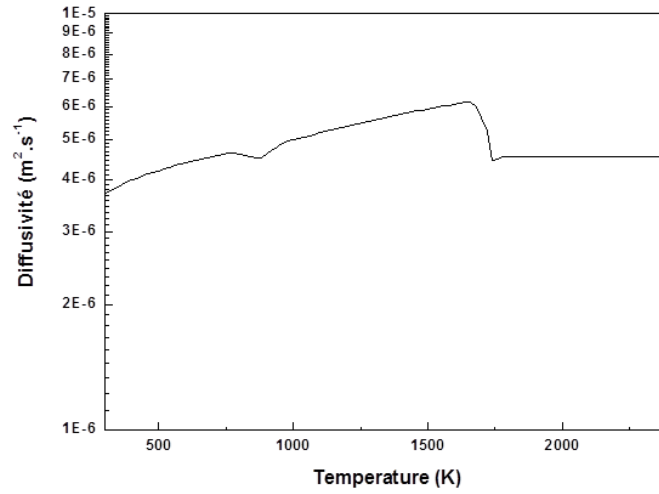
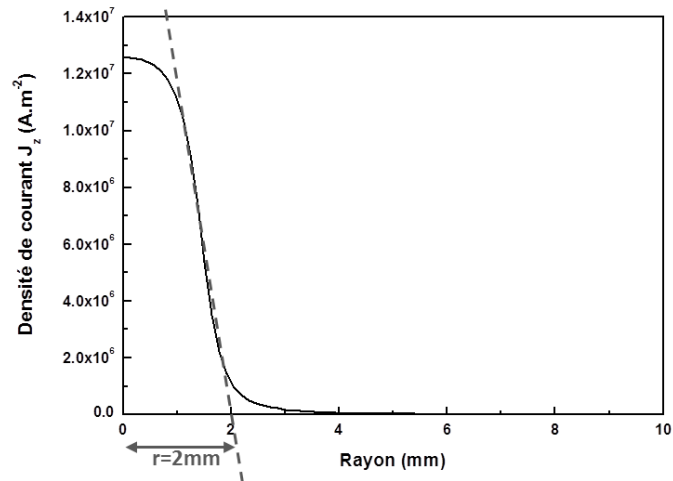
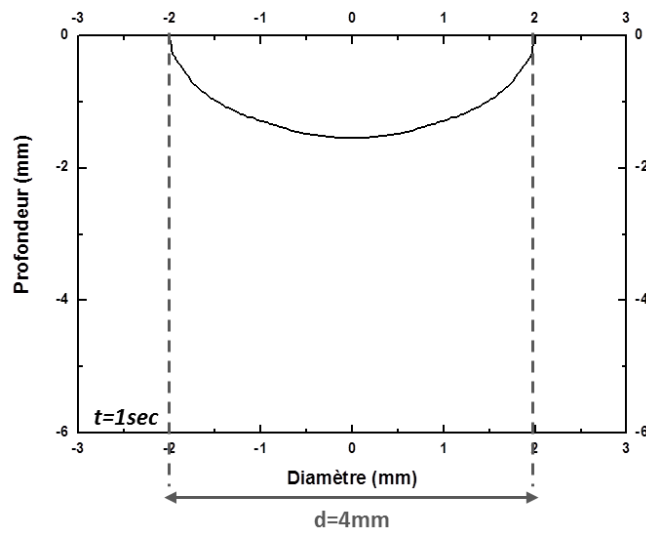


Figure 3.11 : Diffusivité de l'acier 304 en fonction de la température



(a)



(b)

Figure 3.12 : (a) densité de courant à la surface du bain (b) profil du bain après 1 seconde d'interaction

Par ailleurs, certaines études se sont intéressées à la distribution et à la prépondérance de ces flux et ont montré que les composantes majoritaires du flux appliqué à l'anode étaient le flux électrique qui représente 65% du flux total et le flux par conduction, 35% sur l'axe de la décharge ; le flux par conduction serait prépondérant en périphérie de la décharge [Lag04][Zhu95]. L'expansion rapide sur la première seconde s'expliquerait donc par la prédominance de la part électrique sur celle par conduction. Une fois le diamètre du bain supérieur à 4mm, l'expansion ralentit car elle devient majoritairement due à la conduction, phénomène plus lent.

Les images obtenues au microscope ont permis d'observer le profil des bains et d'évaluer leur profondeur de pénétration. La *figure 3.13(a)* présente l'allure des bains obtenue pour les différents temps d'interaction. Il apparaît que la forme des bains n'est pas modifiée avec le temps. Par ailleurs, le diamètre et la profondeur augmentent jusqu'à se stabiliser autour d'une valeur limite après 12 secondes. Ces informations sont aussi visibles sur la *figure 3.13(b)* où les valeurs des profondeurs et diamètres issues des profils de la zone fondue sont tracées. La valeur limite pour le diamètre est de l'ordre de  $8.00 \pm 0.02 \text{ mm}$  et de  $3.95 \pm 0.02 \text{ mm}$  pour la profondeur. La *figure 3.13(c)* décrit l'évolution du rapport profondeur/diamètre (ratio D/W souvent trouvé dans la littérature) des bains en fonction du temps. Ce rapport atteint les 0.5 et reste constant au-delà de 8 secondes indiquant un diamètre équivalent au double de la profondeur de pénétration.

À partir des profils de la zone fondue, le volume de métal équivalent et l'énergie, notée  $E_{fusion}$ , mise en jeu pour faire fondre un tel volume ont été estimés. Cette énergie correspond à l'énergie nécessaire pour faire fondre le métal  $E$  à laquelle vient s'ajouter l'énergie requise pour le changement d'état (solide-liquide)  $mL_f$  où  $L_f$  est la chaleur latente de fusion ( $L_f = 272 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ):

$$E_{fusion} = E + mL_f \quad (II.2.1)$$

L'estimation de l'énergie  $E$  nécessite la connaissance de la capacité calorifique  $C_p(304L)$  de l'acier. Cette grandeur varie en fonction de la température. Cette variation a été prise en compte dans les calculs d'énergie pour ne pas surestimer la valeur de l'énergie  $E$  comme cela aurait été le cas en ne considérant qu'un  $C_p(304L)$  moyen. L'expression de l'énergie de fusion devient donc :

$$E_{fusion} = m \int_{300K}^{2400K} C_p(304L) dT + mL_f \quad (II.2.2)$$

La masse  $m$  est déterminée à partir du volume estimé et de la densité de l'acier ( $\rho = 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Le calcul de l'énergie de fusion a été borné entre 300K et 2400K, température comprise entre la température de fusion de l'acier 304L (1724K) et d'ébullition (3134K). Le choix de cette température est justifié en *annexe 1*. Par ailleurs, il faut noter que ce calcul ne prend pas en compte la part évaporée car aucun moyen ne permet de quantifier la quantité de métal perdue par érosion. L'énergie de fusion calculée est donc surestimée.

Le *tableau 3.1* regroupe les valeurs de volume, de masse d'acier et l'énergie de fusion correspondante pour les différents temps d'interaction. L'énergie appliquée, calculée à partir des relevés de courant et de tension durant les acquisitions, a également été consignée dans le tableau.



**Arcal.37 – Intensité 100A – Longueur de l’arc 5mm – Angle d’affûtage 60°**

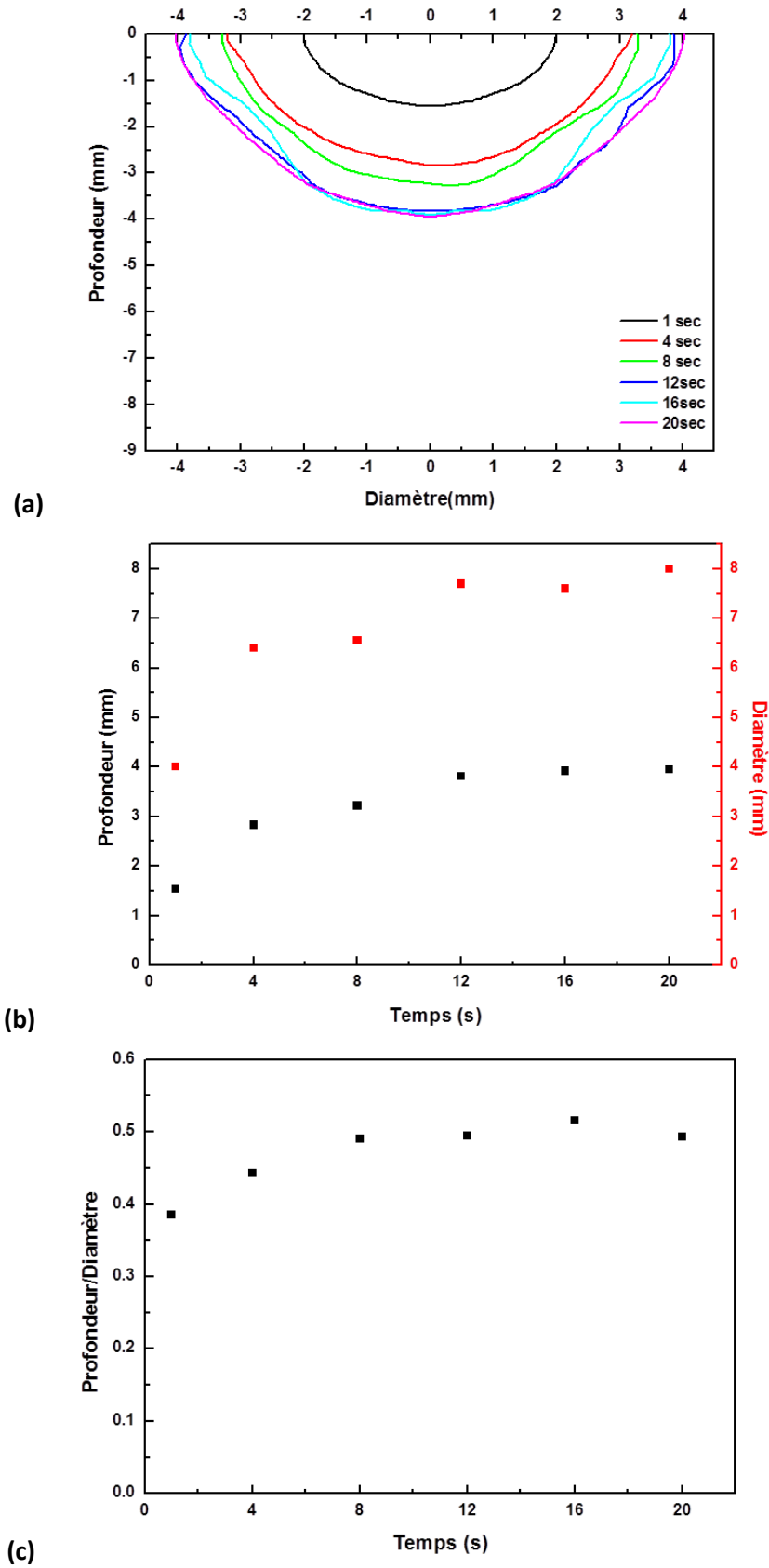


Figure 3.13 : (a) profils de la zone fondue (b) diamètres et profondeurs mesurés (c) évolution du rapport profondeur/diamètre pour les différents temps d’interaction

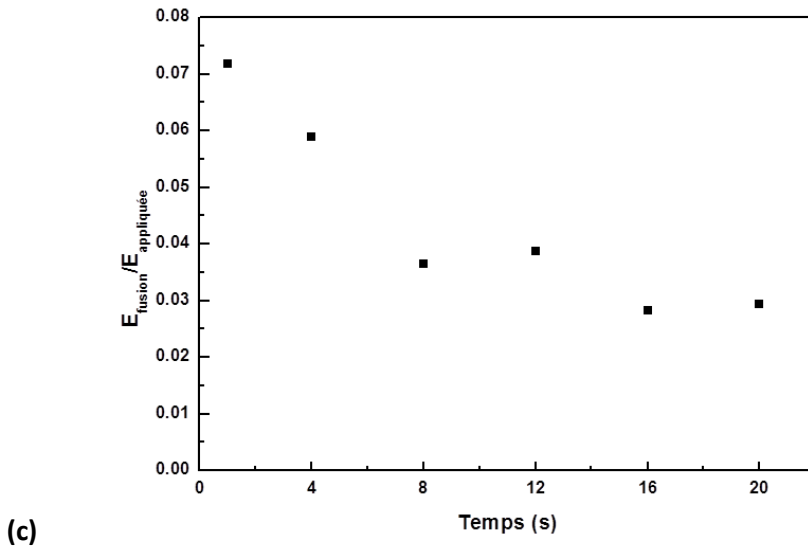
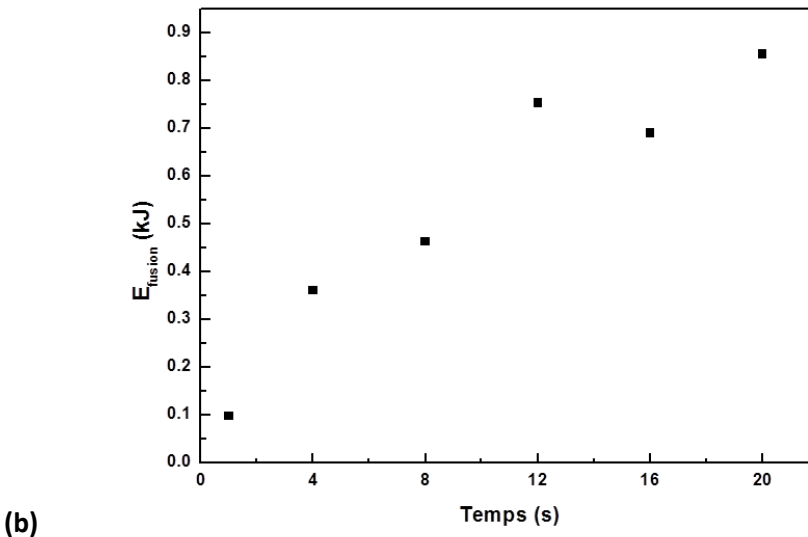
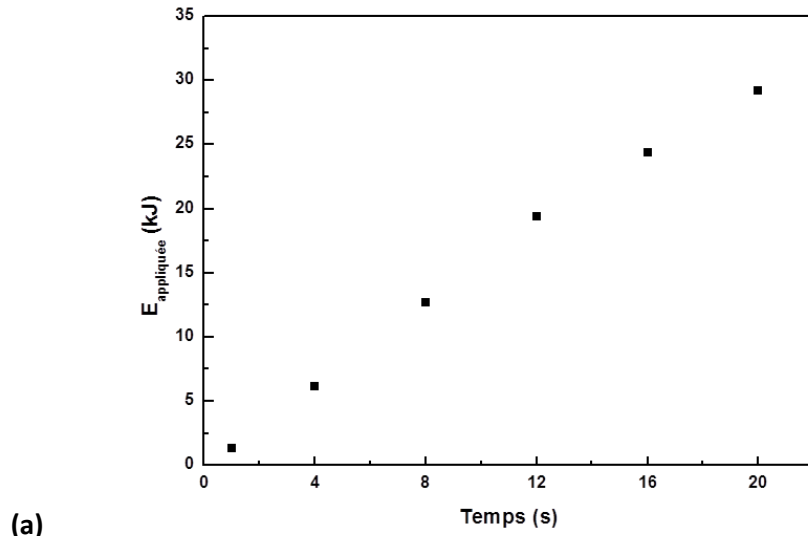
Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d’arc 5mm – Angle d’affutage 60°						
	t=1sec	t=4sec	t=8sec	t=12sec	t=16sec	t=20sec
<b>Volume (mm<sup>3</sup>)</b>	12.2	45.3	58.1	94.5	86.6	107.3
<b>Masse (g)</b>	0.10	0.36	0.46	0.75	0.68	0.85
<b>E<sub>fusion</sub> (kJ)</b>	0.097	0.361	0.462	0.752	0.690	0.854
<b>E<sub>appliquée</sub> (kJ)</b>	1.35	6.12	12.70	19.40	24.42	29.18

*Tableau 3.1 : Bilan des valeurs estimées à partir de la zone fondue*

Les valeurs indexées dans le tableau indiquent que le volume de métal fondu et donc la masse augmente au cours du temps, avec une augmentation plus marquée sur les premiers instants. Ces valeurs sont le reflet de ce qui est observé en termes de profil des zones fondues sur la *figure 3.13(a)*. Les valeurs obtenues pour un temps d’interaction de 16 secondes s’écartent un peu de la tendance mais ceci est probablement dû à l’erreur qui peut être commise au moment de la réalisation du contour sur les images qui affecte par conséquent le calcul du volume et celui de l’énergie de fusion. Une erreur sur le centrage de la découpe semble peu probable puisque ce phénomène est très peu marqué dans le tracé de l’évolution du diamètre (écart de 0.10mm) et aurait montré des incohérences dans l’estimation des profondeurs (*figure 3.13(b)*).

La *figure 3.14* présente l’évolution des différentes énergies calculées en fonction du temps. L’énergie appliquée connaît une augmentation linéaire au cours du temps comme le montre la *figure 3.14(a)* indiquant que la puissance appliquée reste constante. Ceci semble indiquer que la production de vapeurs métalliques n’est pas modifiée au cours du temps. En effet, un changement dans la production de vapeur aurait une influence sur la tension d’arc et donc sur la puissance appliquée. L’énergie de fusion, liée au volume du métal, augmente nécessairement avec le temps d’interaction puisque le volume entré en fusion est plus important (*figure 3.14(b)*). Par ailleurs, la part d’énergie appliquée qui est consacrée à la fusion est comprise entre 8% sur les premiers instants et 3% sur les temps les plus longs (*figure 3.14(c)*). Ceci impliquerait donc des pertes radiatives du plasma et de l’électrode et des pertes par conduction dans le métal plus importantes lorsque le temps d’interaction augmente. Des mesures calorimétriques et de flux rayonné n’ont pas pu être mis en place pour ce projet mais seraient nécessaires pour compléter ces bilans énergétiques.

**Arcal.37 – Intensité 100A – Longueur de l'arc 5mm – Angle d'affûtage 60°**



*Figure 3.14 : (a) énergie appliquée en fonction du temps (b) énergie nécessaire à la fusion du métal en fonction du temps (c) part d'énergie appliquée consacrée à la fusion*

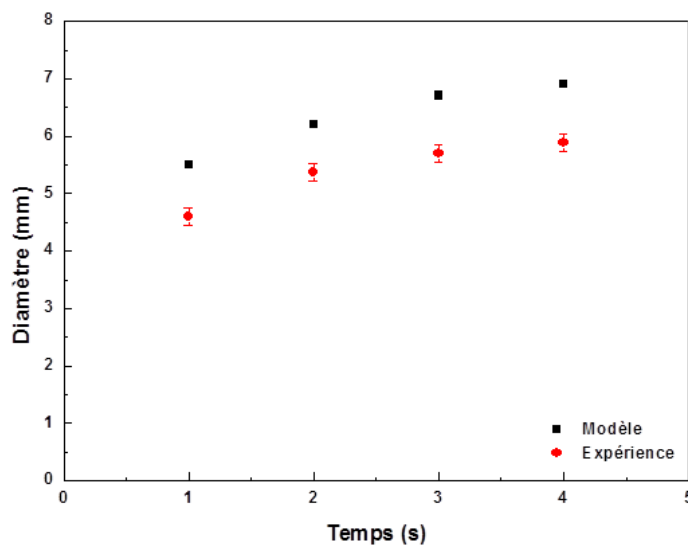
**Discussion**

La comparaison avec les travaux de la littérature est un point délicat du fait de la disparité des conditions opératoires trouvées. De nombreux travaux ont été réalisés par modélisation ou de manière expérimentale en utilisant majoritairement l'argon comme gaz de protection associé à des types d'acier différents : acier 316L [Bro09], acier 304 [Bor13][Per00], acier 304L [Per00][Kou13]. Au cours des chapitres précédents, l'influence de la composition du matériau sur les phénomènes de brassage et donc sur la géométrie résultante a été montrée. À cela s'ajoutent des différences dans la longueur d'arc utilisée, l'angle d'affûtage de la cathode dont la possible influence sur la forme de la zone fondue a été mentionnée au *paragraphe I*. La comparaison s'est naturellement tournée vers les travaux de *J Mougnot* [Mou13a] réalisés au sein de l'équipe concernant l'interaction d'un arc d'Arcal37 avec un acier 304 qui est la configuration la plus proche de celle utilisée dans cette étude. Deux différences persistent néanmoins entre la configuration utilisée dans ces travaux de thèse et celle choisie dans ce modèle : la géométrie de la cathode et la nature de l'acier. Dans cette étude expérimentale, la cathode de diamètre 3.2mm est pointue et l'anode est en acier 304L à teneur en soufre de 300 ppm alors que le modèle utilise une cathode tronquée de même diamètre et un acier 304 avec une teneur en soufre de 200ppm. Concernant l'influence du type de cathode utilisé, certains travaux ont montré que le diamètre de la cathode était un paramètre n'influant ni sur la température du plasma, ni sur sa vitesse d'écoulement, ni sur la température à l'anode [Bor13] alors que d'autres auraient observé que l'augmentation du diamètre de la cathode impliquait un élargissement du bain en influant sur les forces de cisaillements [Mat88]. Par ailleurs, la géométrie tronquée de l'électrode modifierait la distribution du courant impliquant une diminution des forces de Lorentz et thermocapillaires et donc de la pénétration. Les forces de cisaillement seraient également affectées et leur intensité serait inversement proportionnelle à la surface tronquée [Mil90]. Cette modification des forces s'exerçant sur le bain métallique entraîne donc une modification dans le profil de la zone fondue. Malgré les différences mentionnées, l'intensité du courant (100A), la nature du gaz et son débit (Arcal37, 10l/min), la longueur de l'arc (5mm) et l'angle d'affûtage de la cathode (60°) sont identiques dans les deux études. Les résultats du modèle n'étant pas disponibles au-delà de 4 secondes d'interaction, la comparaison ne sera pas effectuée pour des temps plus longs. De plus, les valeurs de pénétrations obtenues expérimentalement (métallographie) n'ont pas été réalisées pour des temps intermédiaires entre 1 et 4 secondes. Le tableau ci-dessous résume donc les dimensions de la zone fondue obtenues dans le cas du modèle et dans cette étude expérimentale pour 1 et 4 secondes :

<b>Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d'arc 5mm – Angle d'affûtage 60°</b>				
<b>Temps d'interaction</b>	<b>t=1 sec</b>		<b>t=4 sec</b>	
<b>Grandeurs comparées</b>	<b>Largeur (mm)</b>	<b>Profondeur (mm)</b>	<b>Largeur (mm)</b>	<b>Profondeur (mm)</b>
<b>Modèle</b>	5.50	0.90	6.90	1.60
<b>Expérience</b>	4.00±0.02	1.54±0.02	6.40±0.02	2.80±0.02

*Tableau 3.2 : Comparaison modèle-expérience des dimensions de la zone fondue*

Les résultats ci-dessus montrent des valeurs de diamètre de la zone fondue plus importants et des valeurs de profondeur plus faibles dans le cas du modèle par rapport à l'expérience quel que soit le temps d'interaction. Pour vérifier ce constat, l'évolution des diamètres entre 1 et 4 secondes a pu être tracée grâce aux mesures d'expansion du bain réalisées par imagerie rapide. La figure ci-dessous présente le diamètre de la zone fondue en fonction du temps obtenu par modélisation (en noir) et par l'expérience (en rouge). Les valeurs estimées par le modèle sont plus élevées que celles déterminées par l'expérience. Par ailleurs, l'évolution sur ces premiers instants est identique. Compte tenu des observations relevées dans la littérature et rapportées ci-dessus, ce résultat s'expliquerait par : la diminution de la force de Lorentz et l'augmentation des forces de cisaillements induites par une géométrie tronquée de la cathode dans le cas du modèle qui viendrait diminuer la pénétration et élargir la zone fondue.



*Figure 3.15 : Comparaison modèle – expérience de l'évolution du diamètre du bain en fonction du temps d'interaction pour un plasma d'Arcal.37 de longueur 5mm en interaction avec un acier 304 sous une intensité de 100A*

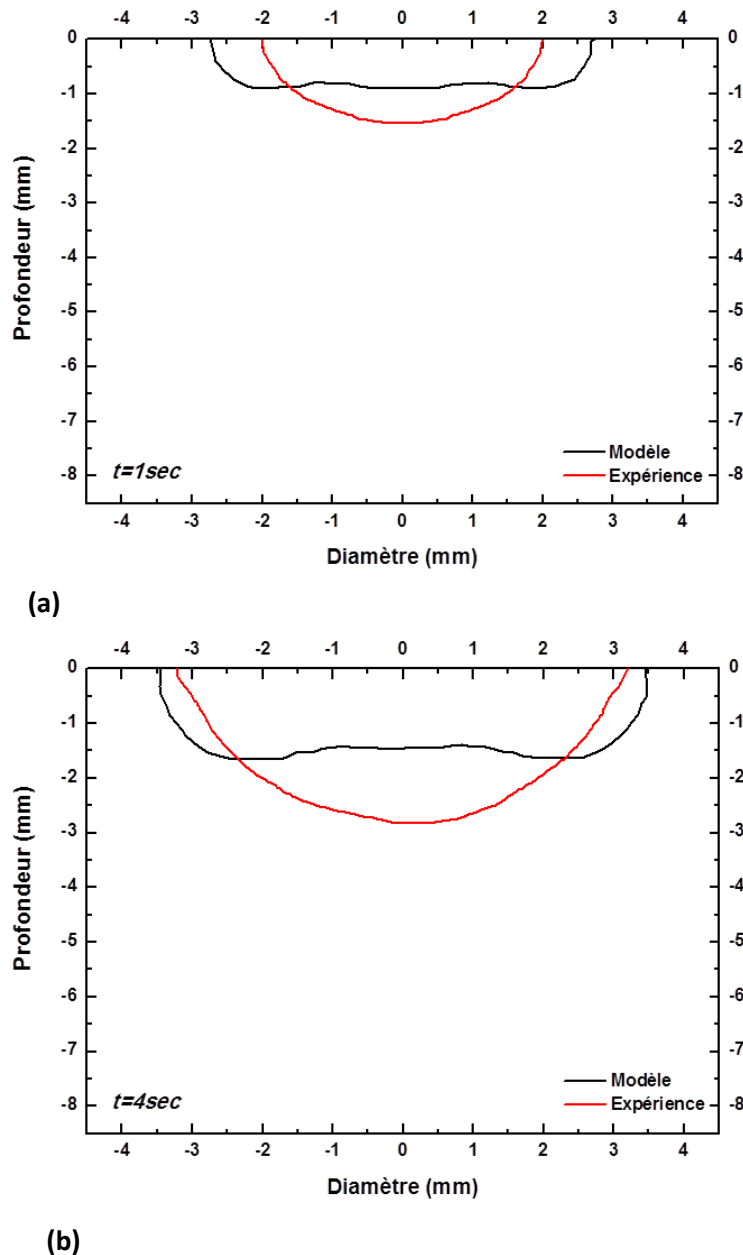
Comme cela a été mentionné, un autre paramètre vient ajouter une différence entre les résultats obtenus par le modèle et l'expérience : la nature de l'acier utilisé. Le tableau ci-dessous présente la composition en pourcentage massique de l'acier 304 à teneur en soufre de 200ppm selon la norme DIN utilisée dans le modèle et celle de notre acier 304L caractérisé dans un laboratoire spécialisé (CETIM-CERMAT, Mulhouse) utilisé dans l'expérience :

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Autres
<b>Acier 304 (modèle)</b>	<0.07	<1.00	<2.00	<0.045	0.020	17.0-19.5	-	8.0-10.5	N<0.11
<b>Acier 304L</b>	0.023	0.44	1.08	0.030	0.030	18.27	0.41	8.05	N=0.07

*Tableau 3.3 : Comparaison de la composition des aciers utilisés dans le modèle et l'expérience*

Dans les chapitres précédents, l'influence des éléments actifs tels que le soufre sur la forme de la zone fondue au travers des mouvements de Marangoni a été mise en avant. La figure 3.16 présente

les profils de la zone fondue obtenue à 1 et 4 secondes par le modèle (en noir) et l'expérience (en rouge).

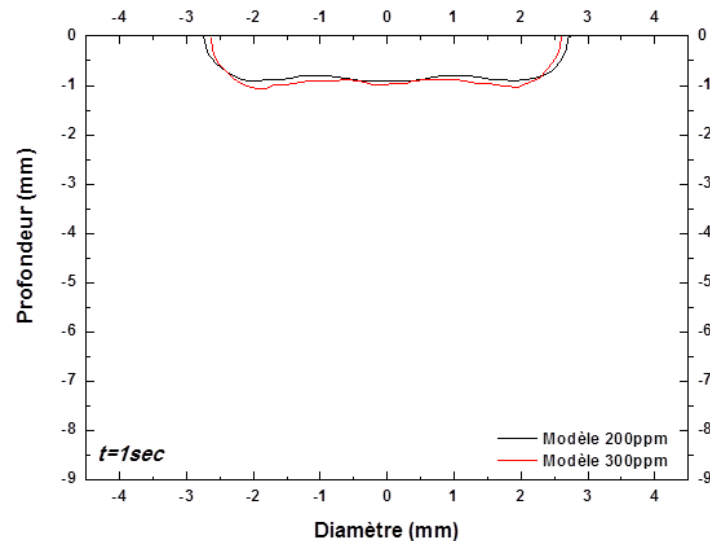


*Figure 3.16 : Comparaison modèle –expérience des profils de la zone fondue obtenus après 1 et 4 secondes d'interaction entre un plasma d'Arcal.37 de longueur 5mm et un acier 304 sous une intensité de 100A*

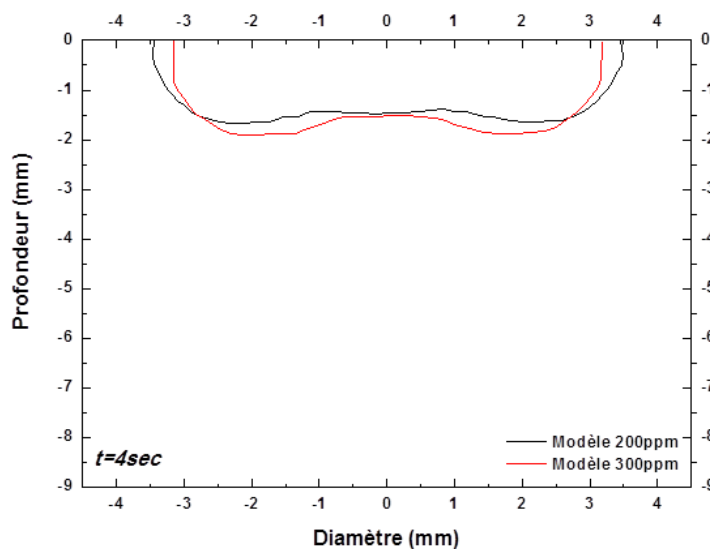
Outre les différences dans les valeurs de diamètres et de pénétrations mentionnées plus haut, les profils de la zone fondue obtenue par le modèle et par l'expérience sont radicalement différents. La géométrie obtenue par l'expérience résulterait de mouvements majoritairement pénétrants donnant cette forme de « bol » alors que celle obtenue par modélisation résulterait plutôt d'une combinaison de mouvements mouillants et pénétrants entraînant cette formation de double vortex. Cette différence pourrait s'expliquer aussi par la nature des aciers utilisés dans les deux études, notamment par la teneur en soufre influant sur la température d'inversion du

coefficient de Marangoni (cf. *Chapitre 2*) ainsi que par la prépondérance d'une force par rapport à une autre s'exerçant sur le bain due à la géométrie tronquée de la cathode dans le cas du modèle.

Pour s'affranchir d'une des deux hypothèses, les calculs de modélisation ont ensuite été effectués sur une anode en acier 304 à teneur en soufre équivalente à celle utilisée dans l'expérience, soit 300ppm. La figure ci-dessous présente les profils de la zone fondue obtenue par modélisation pour 200 et 300ppm. Une modification du diamètre et de la profondeur est constatée mais l'allure du profil n'est pas modifiée par l'augmentation de la teneur en soufre.



(a)

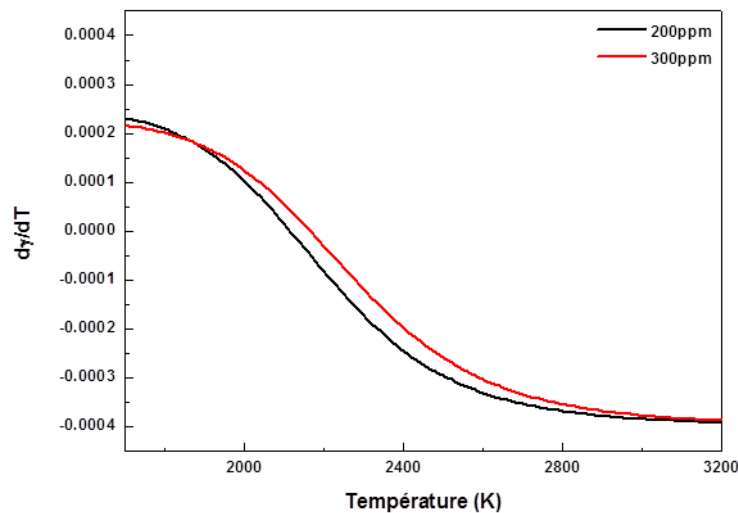


(b)

*Figure 3.17 : Comparaison des profils de la zone fondue obtenus par modélisation après 1 et 4 secondes d'interaction entre un plasma d'Arcal.37 de longueur 5mm et un acier 304 sous une intensité de 100A pour deux teneurs en soufre différentes*

Une telle modification de la teneur en soufre n'a donc pas d'effet notable sur la température d'inversion du coefficient de Marangoni. Ce résultat est en effet vérifié sur la *figure 3.18* présentant le coefficient de Marangoni en fonction de la température pour ces deux teneurs en soufre. La

température d'inversion n'est modifiée que de 40K. Il semble donc que l'effet de la cathode soit le paramètre à l'origine de ces différences dans la forme de la zone fondue. L'influence d'un tel paramètre n'a pas pu être étudié expérimentalement dans le temps consacré à cette étude. Par ailleurs, pour confirmer et valider le modèle, il serait également intéressant de mesurer la température en surface du bain métallique pendant la phase d'arc. Ce type d'étude n'a pu être réalisé dans ce projet mais pourrait permettre d'obtenir des informations supplémentaires pour la compréhension des phénomènes et la comparaison modèle-expérience.



*Figure 3.18 : Comparaison du coefficient de Marangoni en fonction de la température pour une concentration en soufre de 200 et 300ppm*

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis d'observer l'évolution du diamètre du bain pendant 20 secondes d'interaction et de proposer une explication à cette expansion. La forme de la zone fondue a également été analysée et les grandeurs obtenues ont été comparées à celles estimées par la modélisation. Ceci a permis de montrer qu'un écart entre un ou deux paramètres opératoires venait compliquer la comparaison entre études, comme cela avait été pressenti en examinant les travaux de la littérature. Le paragraphe ci-dessous présente maintenant l'extension de cette étude expérimentale à la modification de certains paramètres opératoires pour essayer de préciser leur influence sur la forme de la zone fondue et également d'apporter un jeu de données parfois nécessaire aux travaux de modélisation.

### **III. Influence des paramètres opératoires**

*Note : les grandeurs obtenues pour les différentes configurations seront présentées au travers de graphes mais le détail des valeurs numériques associées est reporté en annexes 2 et 3.*

L'étude de l'influence des paramètres opératoires a été réalisée en modifiant à chaque fois une grandeur. Tous les cas ont été analysés de la manière qui a été introduite au *paragraphe II.2*, permettant de comparer l'effet de l'intensité du courant, de la nature du gaz, de la longueur d'arc et de l'angle d'affutage de la cathode. Pour faciliter l'analyse des résultats, les différentes configurations étudiées sont regroupées et indexées dans le *tableau 3.4*.



Nom	Gaz	Intensité	Longueur d'arc	Angle d'affutage
Cas n°1	Arcal37	100A	5mm	60°
Cas n°2	Arcal37	150A	5mm	60°
Cas n°3	Arcal37	100A	3mm	60°
Cas n°4	Hélium	100A	3mm	60°
Cas n°5	Arcal37	100A	5mm	30°
Cas n°6	Arcal37	100A	3mm	30°
Cas n°7	Hélium	100A	3mm	30°

Tableau 3.4 : Configurations étudiées

Les autres paramètres restent inchangés : une anode cylindrique en acier 304L de 50mm de diamètre et d'épaisseur 10mm, une cathode pointe en tungstène-lanthane de 3.2mm de diamètre, un débit de gaz de 10l/min. L'anode en acier est posée sur un support en cuivre non refroidi. Dans un premier temps l'influence d'un refroidissement naturel par conduction, dû au support en cuivre qui pourrait affecter la profondeur de pénétration des bains, a été étudiée. Pour cela, le profil de la zone fondue obtenue pour deux épaisseurs d'anode différentes a été comparé pour deux temps d'interaction suffisamment longs pour que le phénomène de refroidissement, s'il a lieu, soit significatif (12 et 20 secondes). La figure ci-dessous présente les profils de bains pour un plasma d'Arcal37 de 5mm sous une intensité de 100A après 12 secondes d'interaction pour les profils tracés en noir et 20 secondes d'interaction pour ceux tracés en rouge. Les profils en pointillés correspondent aux profils obtenus avec l'anode d'épaisseur la plus élevée, soit 15mm.

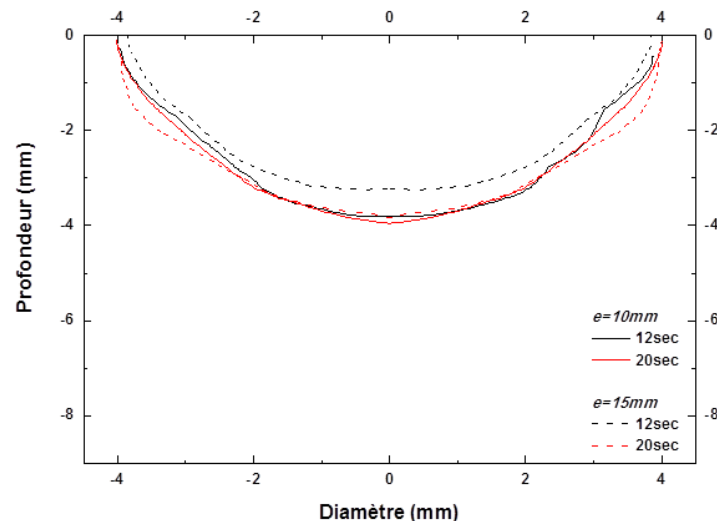


Figure 3.19 : Profils de la zone fondue pour deux épaisseurs d'anode après 12 et 20 secondes d'interaction entre un plasma d'Arcal.37 de longueur 5mm et un acier 304L sous une intensité de 100A

Le profil de la zone fondue ne semble pas être affecté par une modification de l'épaisseur de l'anode. Les valeurs de pénétration et de diamètre obtenues sont groupées dans le *tableau 3.5*. Les valeurs de diamètres déterminées pour les deux épaisseurs sont équivalentes pour un temps d'interaction de 20 secondes. Par ailleurs, un écart de  $0.08 \pm 0.02$  mm est observé entre les deux épaisseurs pour un temps d'interaction de 12 secondes. Pour les deux épaisseurs d'anode, la

pénétration augmente avec le temps. Cette augmentation est plus marquée dans le cas d'une épaisseur de 15mm (0.60mm) que pour une épaisseur de 10mm (0.14mm). Par ailleurs, pour un même temps d'interaction, un écart est constaté entre les valeurs de profondeur pour les deux épaisseurs : la profondeur atteinte à 12 secondes dans le cas d'une anode d'épaisseur 15mm est plus faible que celle atteinte avec une anode d'épaisseur 10mm. Si le support en cuivre exerçait un refroidissement naturel, l'anode d'épaisseur la plus fine en serait affectée. Bien que l'écart sur la valeur du diamètre puisse être considérée comme négligeable il est possible que l'écart constaté sur la profondeur soit dû à une erreur de centrage de la découpe pour l'échantillon d'épaisseur 15mm (t=12sec). Toutefois, pour le temps d'interaction le plus long (t=20sec), un écart de  $0.13\pm 0.02\text{mm}$  est observé entre les deux épaisseurs avec une pénétration plus importante pour l'anode d'épaisseur la plus fine. Cet écart n'est pas suffisamment marqué et va à l'encontre de l'hypothèse d'un refroidissement exercé par le support en cuivre. Les écarts observés sont donc plutôt liés à une accumulation d'erreurs expérimentales (exactitude du temps d'interaction, découpe, mesures...).

Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d'arc 5mm – Angle d'affutage 60°				
Épaisseur d'anode	e=10mm		e=15mm	
Temps d'interaction	t=12sec	t=20sec	t=12sec	t=20sec
Diamètre (mm)	7.72	8.04	7.64	8.04
Profondeur (mm)	3.81	3.95	3.22	3.82

Tableau 3.5 : Diamètres et profondeurs estimées pour deux épaisseurs d'anode après 12 et 20 secondes d'interaction entre un plasma d'Arcal.37 de longueur 5mm et un acier 304L sous une intensité de 100A

Ces deux échantillons ont néanmoins permis de s'assurer de la reproductibilité des mesures en terme de comportement même si quelques écarts de valeurs peuvent parfois apparaître. Ce constat est visible sur la *figure 3.20* présentant les mesures de l'expansion du bain, les diamètres finaux obtenus par photographie et par métallographie pour les échantillons d'épaisseur 10 et 15mm.

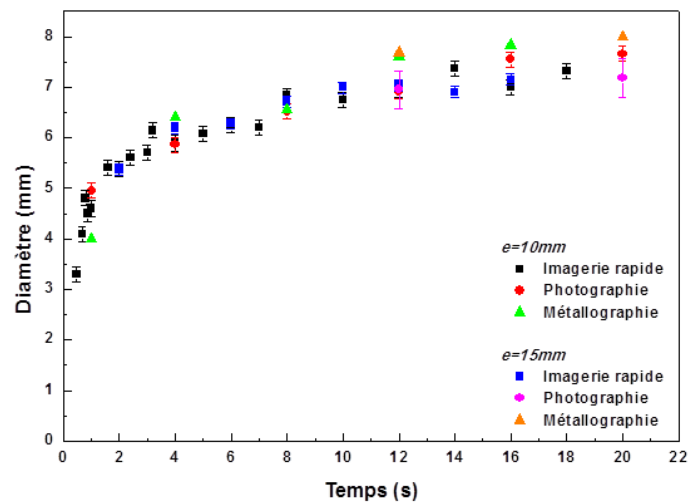


Figure 3.20 : Evolution du diamètre du bain en fonction du temps pour deux épaisseurs d'anode. pour un plasma d'Arcal.37 de longueur 5mm en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 100A

Le *tableau 3.6* présente les valeurs d'énergies calculées pour les deux échantillons à 12 et 20 secondes. Pour chaque temps d'interaction, les valeurs d'énergie obtenues pour les deux épaisseurs sont comparables. La part d'énergie appliquée consacrée à la fusion suit le même comportement pour les deux échantillons puisqu'elle diminue entre 12 et 20 secondes. Les mesures sur ces deux échantillons mettent donc en avant la reproductibilité du procédé en termes d'énergie appliquée et d'énergie impliquée dans la fusion du métal.

	t = 12 secondes	t = 20 secondes
<b>e = 10mm</b>	$E_{\text{appliquée}} = 19.4 \text{ kJ}$	$E_{\text{appliquée}} = 29.2 \text{ kJ}$
	$E_{\text{fusion}} = 0.75 \text{ kJ}$	$E_{\text{fusion}} = 0.89 \text{ kJ}$
	$E_{\text{fusion}}/ E_{\text{appliquée}} = 0.038$	$E_{\text{fusion}}/ E_{\text{appliquée}} = 0.031$
<b>e = 15mm</b>	$E_{\text{appliquée}} = 19.5 \text{ kJ}$	$E_{\text{appliquée}} = 31 \text{ kJ}$
	$E_{\text{fusion}} = 0.73 \text{ kJ}$	$E_{\text{fusion}} = 1 \text{ kJ}$
	$E_{\text{fusion}}/ E_{\text{appliquée}} = 0.037$	$E_{\text{fusion}}/ E_{\text{appliquée}} = 0.032$

*Tableau 3.6 : Valeurs d'énergie estimées pour deux épaisseurs d'anodes après 12 et 20 secondes d'interaction*

Cette étude préliminaire a mis en évidence l'absence d'influence du support en cuivre sur les résultats obtenus et permet d'étudier l'effet des autres paramètres présentés dans les sections suivantes.

### ***Influence de l'intensité du courant***

Dans cette section, l'influence de l'intensité du courant sur l'expansion du bain métallique, sur la forme de la zone fondue et sur les énergies mises en jeu dans le processus sont analysés. Pour cela, les cas n°1 et 2 ont été comparés, le seul paramètre modifié étant l'intensité du courant. La figure ci-dessous présente l'évolution du diamètre des bains pour une intensité de 100 et 150A. Pour ces deux intensités, l'expansion du bain suit le même comportement : une augmentation rapide du diamètre pendant la première seconde suivi d'un ralentissement de l'expansion. Les diamètres résultants de l'interaction sous une intensité de 150A sont plus élevés dès la première seconde.

Comme cela a été évoqué précédemment, le mécanisme majoritaire qui serait impliqué dans l'expansion du bain pendant la première seconde serait le flux électrique. La *figure 3.22(a)* présente la densité de courant axiale issue des données de modélisation pour les deux intensités mises en jeu dans cette étude. L'analyse pour une intensité de courant de 100A a été tracée sur la figure pour observer les différences mais son examen a déjà été fait au *paragraphe II.2*. Dans le cas d'une intensité de 150A, le rayon d'accrochage en surface de l'anode est de 2.60mm soit un diamètre de 5.20mm. Le profil de la zone fondue tracée à partir de l'observation au microscope après 1 seconde d'interaction est présenté sur la *figure 3.22(b)*. Le diamètre obtenu dans ce cas est de  $6.00 \pm 0.02 \text{ mm}$  ce qui reste cohérent avec l'hypothèse énoncée.

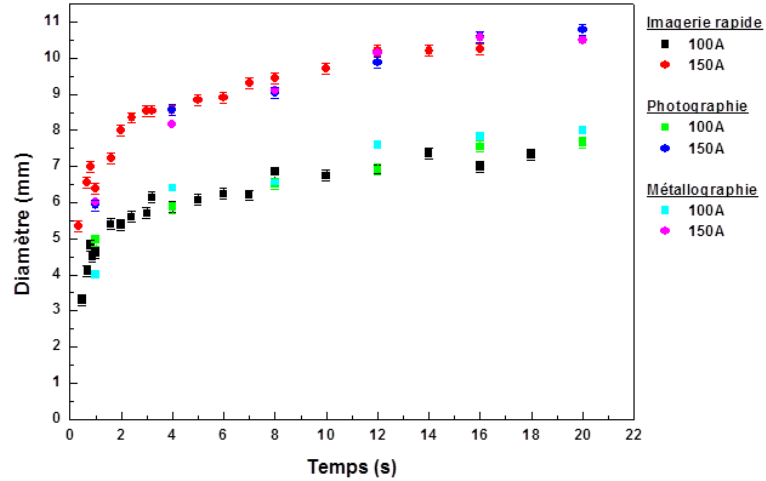


Figure 3.21 : Evolution du diamètre du bain en fonction du temps pour un plasma d'Arcal.37 de longueur 5mm en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 100A et 150A

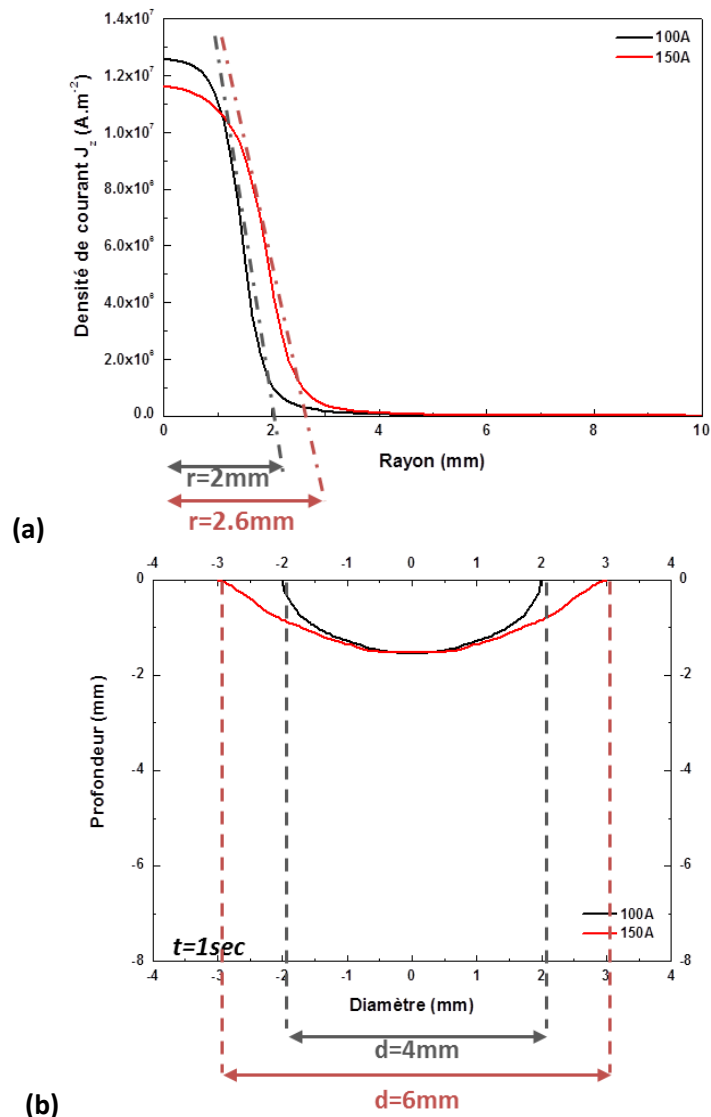


Figure 3.22 : (a) densité de courant à la surface du bain (b) profil du bain après 1 seconde d'interaction pour les deux intensités considérées

L'observation des profils après 1 seconde (*figure 3.22(b)*) semble indiquer une différence dans la forme de la zone fondue lors de ce changement d'intensité. La *figure 3.23(a)* regroupe les profils de bain obtenus pour les deux intensités entre 1 et 20 secondes. Les profils représentés en pointillés correspondent au cas n°1, soit une intensité de 100A et les profils tracés en traits pleins au cas n°2, soit une intensité de 150A. L'analyse de ces profils montre que la géométrie n'est pas modifiée par l'augmentation de l'intensité. L'expansion rapide du diamètre de la zone fondue sur les premiers instants et des valeurs de diamètres plus importants pour une intensité de 150A comme l'avait montré l'analyse de la *figure 3.21* se retrouvent également sur cette figure. Les profondeurs sont également plus importantes dans le cas d'une intensité de 150A mais la stabilisation qui avait pu être constatée pour le cas à 100A semble moins marquée. Ces constats sont plus facilement observables sur la *figure 3.23(b)* où les diamètres et profondeur des bains mesurés sur les images réalisées au microscope ont été reportés. La valeur limite pour le diamètre est de l'ordre de  $10.5 \pm 0.02 \text{mm}$  (resp.  $8.00 \pm 0.02 \text{mm}$ ) et la profondeur maximale atteinte est de  $5.92 \pm 0.02 \text{mm}$  (resp.  $3.95 \pm 0.02 \text{mm}$ ) à 150A (resp. 100A). La *figure 3.23(c)* décrit l'évolution du rapport profondeur/diamètre de la zone fondue en fonction du temps. Ce rapport n'évolue pas tout à fait de la même manière selon l'intensité. Alors qu'il se stabilise autour de 0.50 dans le cas n°1, le rapport semble continuer à augmenter dans le cas n°2 indiquant que, contrairement au diamètre, la profondeur de pénétration ne tend pas vers une valeur limite comme cela avait été observé sur la *figure 3.23(a)*. Dans les configurations étudiées ici, il semblerait que l'augmentation de l'intensité du courant rende prédominante les forces pénétrantes (forces de Marangoni, de pression, de Lorentz) induisant une augmentation de la pénétration. Comme cela a été détaillé dans le *paragraphe II.2*, les profils de la zone fondue ont permis de déterminer le volume de métal fondu et de comparer les énergies mises en jeu pour les deux configurations. La *figure 3.24* présente l'évolution des différentes énergies calculées en fonction du temps. L'énergie appliquée augmente linéairement au cours du temps quelle que soit l'intensité appliquée indiquant que la puissance reste constante et que la production de vapeurs métalliques n'est pas modifiée au cours du temps. Par ailleurs, l'énergie fournie dans le cas n°2 est plus importante étant donné que l'intensité appliquée a augmenté. Après 20 secondes d'interaction, un écart de 17kJ est constaté entre les deux configurations. L'énergie de fusion mise en jeu dans le cas n°2 est plus importante puisque les volumes de métal fondu sont plus imposants à forte intensité (*figure 3.24(b)*). Alors qu'une diminution dans la part d'énergie appliquée consacrée à la fusion est constatée pour le cas n°1 (*figure 3.24(c)*), cette proportion reste constante dans le cas n°2. Cela semble indiquer qu'il y a moins de pertes par radiation, conduction ou évaporation, lorsque l'intensité est plus élevée et que le procédé serait plus efficace.

### Conclusions

Dans cette partie, l'influence de l'intensité du courant sur l'expansion du diamètre du bain métallique, sur la forme de la zone fondue et sur les énergies impliquées dans le procédé a été évaluée. L'intensité du courant est donc un paramètre influant sur le volume de la zone fondue, le diamètre et la profondeur étant plus importants lorsque l'intensité est élevée quel que soit le temps

d'interaction. Ces effets peuvent être expliqués par l'augmentation du rayon d'accroche de l'arc et par la prédominance des mouvements pénétrants du bain liquide lorsque l'intensité augmente.

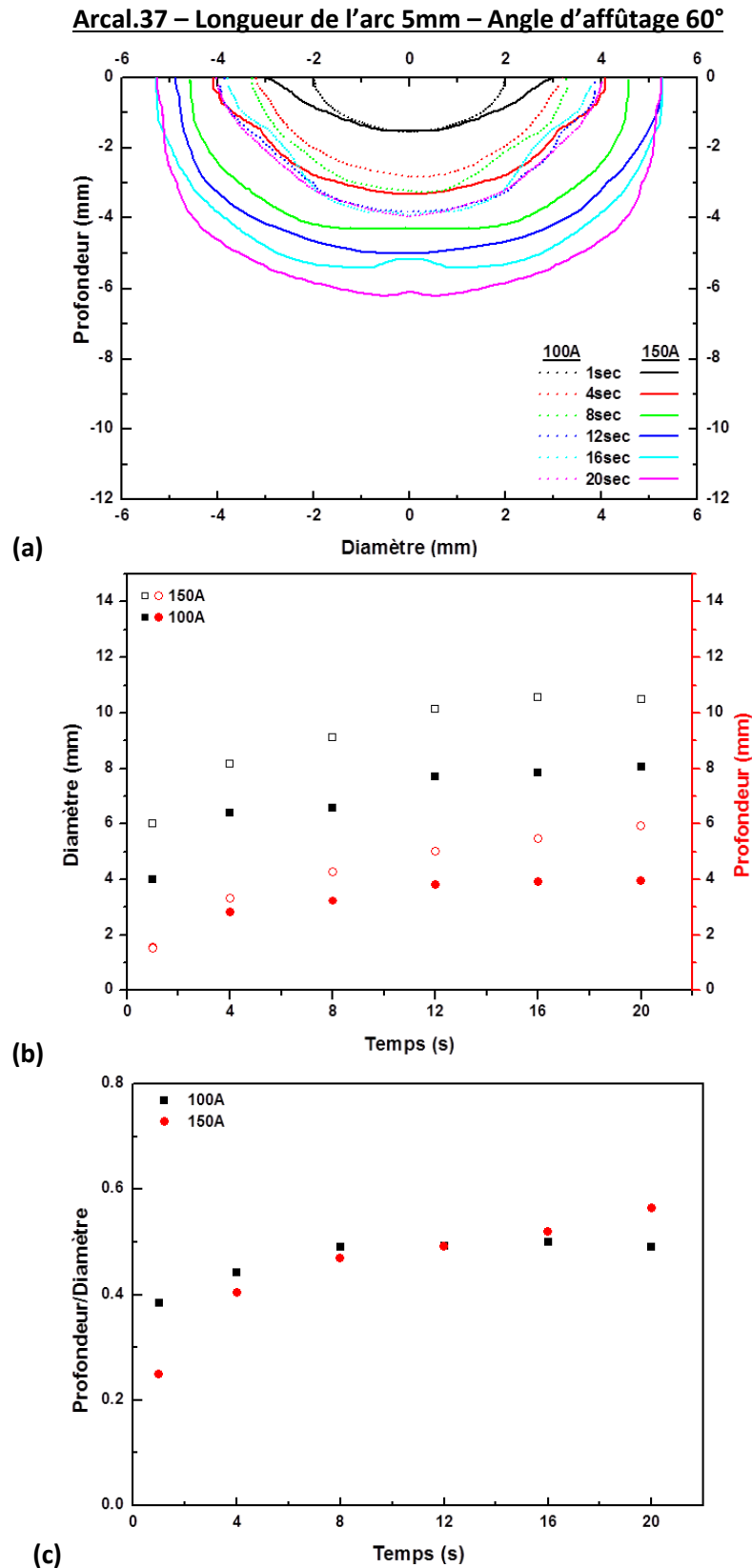


Figure 3.23 : (a) profils de la zone fondue (b) diamètres et profondeurs mesurées (c) évolution du rapport profondeur/diamètre pour les deux intensités considérées

**Arcal.37 – Longueur de l'arc 5mm – Angle d'affûtage 60°**

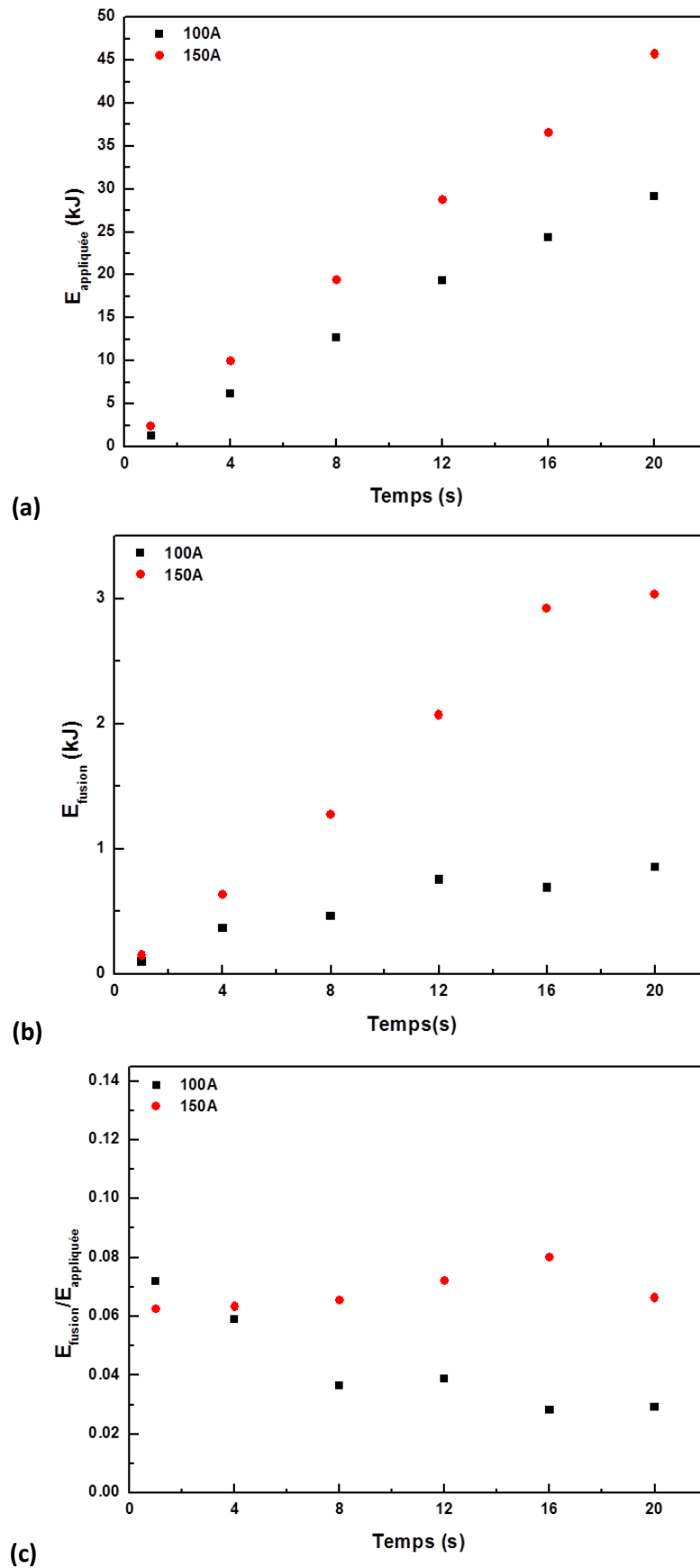


Figure 3.24 : (a) énergie appliquée en fonction du temps (b) énergie nécessaire à la fusion du métal en fonction du temps (c) part d'énergie appliquée consacrée à la fusion pour les deux intensités considérées

### Influence de la longueur d'arc

Dans cette section, l'influence de la longueur d'arc sur l'expansion du bain métallique, sur la forme de la zone fondue et sur les énergies mises en jeu dans le processus est analysée. Pour cela, les cas n°1 et 3 ont été comparés, le seul paramètre modifié étant la longueur de l'arc. La figure ci-dessous (figure 3.25) présente l'évolution du diamètre des bains pour un arc de longueur 5mm et 3mm. Pour ces deux longueurs, l'expansion du bain suit le même comportement : une augmentation rapide du diamètre sur la première seconde suivi d'un ralentissement de l'expansion. Les diamètres résultants de l'interaction d'un arc de longueur 5mm sont plus élevés, notamment après 8 secondes d'interaction.

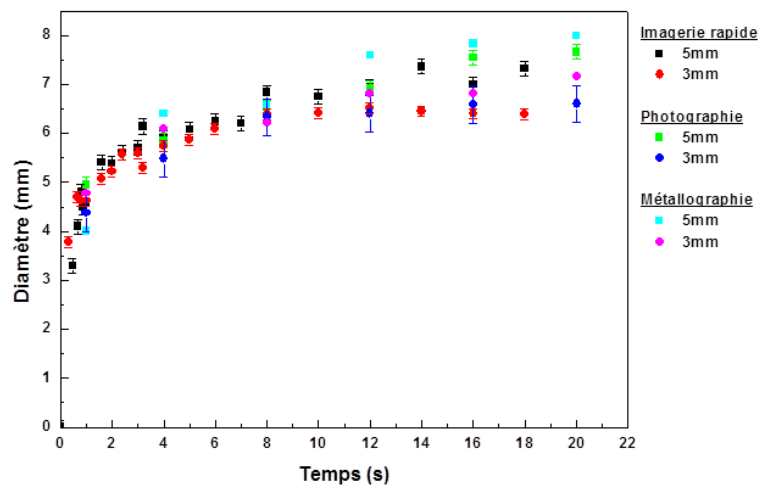
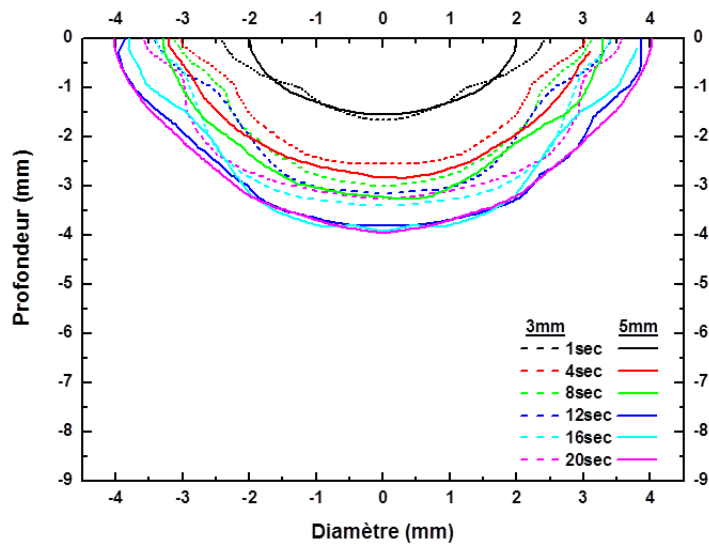


Figure 3.25 : Evolution du diamètre du bain en fonction du temps pour un plasma d'Arcal.37 en interaction avec un acier 304L sous une intensité de 100A pour deux longueurs d'arc

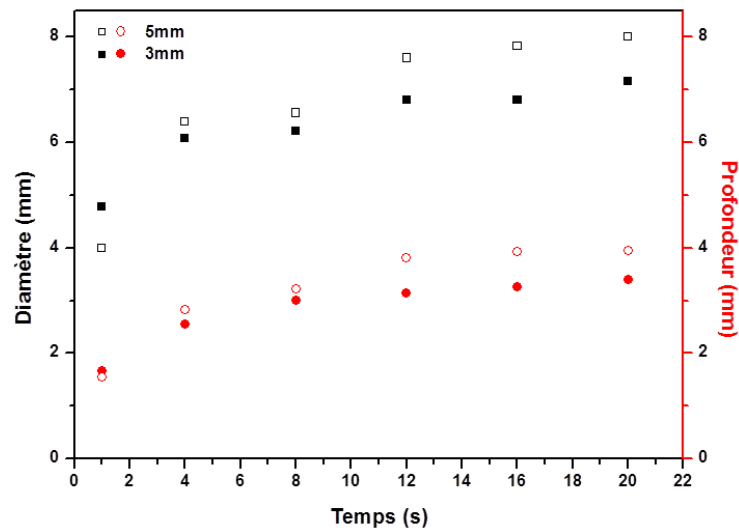
La figure 3.26(a) regroupe les profils de bain obtenus pour les deux longueurs d'arc entre 1 et 20 secondes. Les profils représentés en pointillés correspondent au cas n°3, soit une longueur d'arc de 3mm et les profils tracés en trait plein au cas n°1, soit une longueur d'arc de 5mm. L'analyse de ces mesures montre que le profil du bain est légèrement modifié par la diminution de la longueur d'arc. En effet, alors que les profils ont une forme de « bol » dans le cas d'une interaction avec un arc de longueur 5mm, des renflements apparaissent de chaque côté du profil pour ceux résultant d'une interaction avec un arc de longueur 3mm. L'expansion rapide du diamètre de la zone fondue sur les premiers instants et des valeurs de diamètres plus importantes après 8 secondes d'interaction pour une longueur d'arc de 5mm comme l'avait montrée l'analyse de la figure 3.25 sont observés également sur cette figure. Les profondeurs sont également plus importantes dans le cas d'une longueur d'arc de 5mm avec une stabilisation assez marquée sur les derniers instants dans les deux cas. Ces constats sont plus facilement observables sur la figure 3.26(b) où les diamètres et profondeurs des bains mesurés sur les images réalisées au microscope ont été reportés. La valeur limite pour le diamètre est de l'ordre de  $8.00 \pm 0.02 \text{ mm}$  (resp.  $7.16 \pm 0.02 \text{ mm}$ ) et la profondeur maximale atteinte est de  $3.95 \pm 0.02 \text{ mm}$  (resp.  $3.40 \pm 0.02 \text{ mm}$ ) pour une longueur d'arc de 5mm (resp. 3mm). La figure 3.26(c) décrit l'évolution du rapport profondeur/diamètre de la zone fondue en fonction du temps. Ce rapport évolue sensiblement de la même manière selon la longueur de l'arc en se stabilisant autour de 0.50 indiquant que les profondeurs sont le double du diamètre.



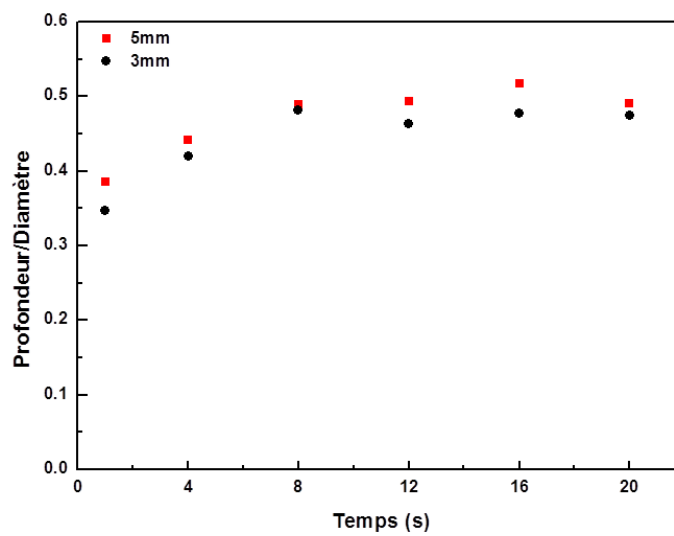
**Arcal.37 – Intensité 100A – Angle d'affûtage 60°**



(a)



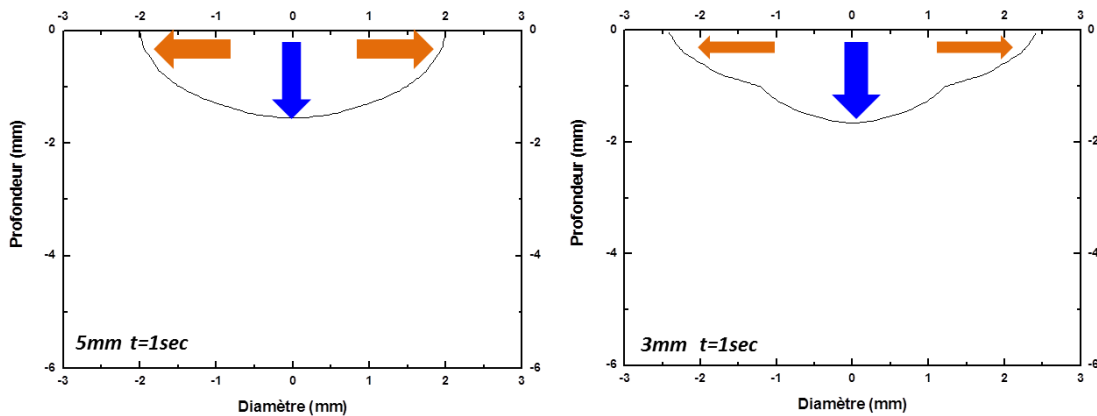
(b)



(c)

Figure 3.26 : (a) profils de la zone fondue (b) diamètres et profondeurs mesurées (c) évolution du rapport profondeur/diamètre pour les deux longueurs d'arc considérées

Dans les configurations étudiées ici, il semblerait que la diminution de la longueur d'arc modifie la prépondérance des forces s'exerçant sur le bain métallique. Il a été mentionné que l'augmentation de la longueur d'arc conduisait à une augmentation des forces de cisaillements impliquant un étalement du bain (cf. *paragraphe 1*) et entraînait une augmentation des forces de pression induisant des pénétrations plus importantes (cf. *Chapitre 2*). Ceci semble cohérent avec ce qui a été observé puisque la longueur d'arc la plus élevée induit des diamètres et des profondeurs de bain plus importants. Cette modification dans l'équilibre des forces pourrait être à l'origine de la modification de la forme de la zone fondue qui est observée. La *figure 3.27* représente schématiquement cette hypothèse.



*Figure 3.27 : Schéma représentant la prépondérance des forces s'exerçant pour les deux longueurs d'arc.*

Les flèches en orange décrivent les forces mouillantes et celles en bleue les forces pénétrantes dont l'intensité, illustrée par l'épaisseur des flèches, est modifiée par la longueur d'arc. Pour valider cette hypothèse, il serait nécessaire d'avoir d'autres informations telles que la température en surface du bain de manière à identifier la direction des courants de Marangoni selon la longueur de l'arc et pouvoir ainsi préciser le phénomène de brassage présent dans le bain et donc la géométrie obtenue.

Comme précédemment, les profils de la zone fondue ont permis de déterminer le volume de métal fondu et de comparer les énergies mises en jeu pour les deux configurations. La *figure 3.28* présente l'évolution des différentes énergies calculées en fonction du temps. L'énergie appliquée augmente linéairement au cours du temps quelle que soit la longueur d'arc indiquant que la puissance appliquée reste constante. Ceci semble indiquer que la production de vapeurs métalliques n'est pas modifiée au cours du temps. Par ailleurs, l'énergie appliquée dans les deux cas ne semble pas grandement modifiée avec ce changement de longueur d'arc. Après 20 secondes d'interaction, un écart de seulement 1.36 kJ est constaté entre les deux configurations. L'énergie de fusion mise en jeu dans le cas n°1 est plus importante puisque les volumes de métal fondu sont plus imposants lorsque la longueur de l'arc est grande (*figure 3.28(b)*). La valeur qui s'écarte de la tendance dans le cas d'un arc de longueur 5mm après 12 secondes d'interaction a été commentée au *paragraphe II.2* lors du détail du cas n°1. Dans les deux cas, une diminution dans la part d'énergie appliquée consacrée à la fusion (*figure 3.28(c)*) est constatée mais cette dernière semble être plus marquée sur

la première seconde dans le cas de l'arc de longueur 3mm. Pour des temps d'interaction plus longs, le comportement entre les deux longueurs d'arc est identique et l'écart observé n'apparaît pas de façon significative. Cela semble indiquer que les pertes par radiation, conduction ou évaporation, sont équivalentes pour les deux longueurs d'arc considérées et que l'efficacité du procédé reste sensiblement la même.

### Conclusions

Au cours de cette étude, l'influence de la longueur d'arc sur l'expansion du diamètre du bain métallique, sur la forme de la zone fondue et sur les énergies impliquées dans le procédé a été évaluée. Il apparaît que la longueur d'arc est un paramètre influant sur le volume de la zone fondue, le diamètre et la profondeur étant plus importants lorsque la longueur d'arc est élevée quel que soit le temps d'interaction. Ces effets peuvent être expliqués par la modification de la prédominance des mouvements pénétrants et mouillants du bain liquide lorsque la longueur d'arc augmente. Cette fois encore, les conditions opératoires relevées dans la littérature rendent ces constats difficiles à confronter.

**Arcal.37 – Intensité 100A - Angle d'affûtage de la cathode 60°**

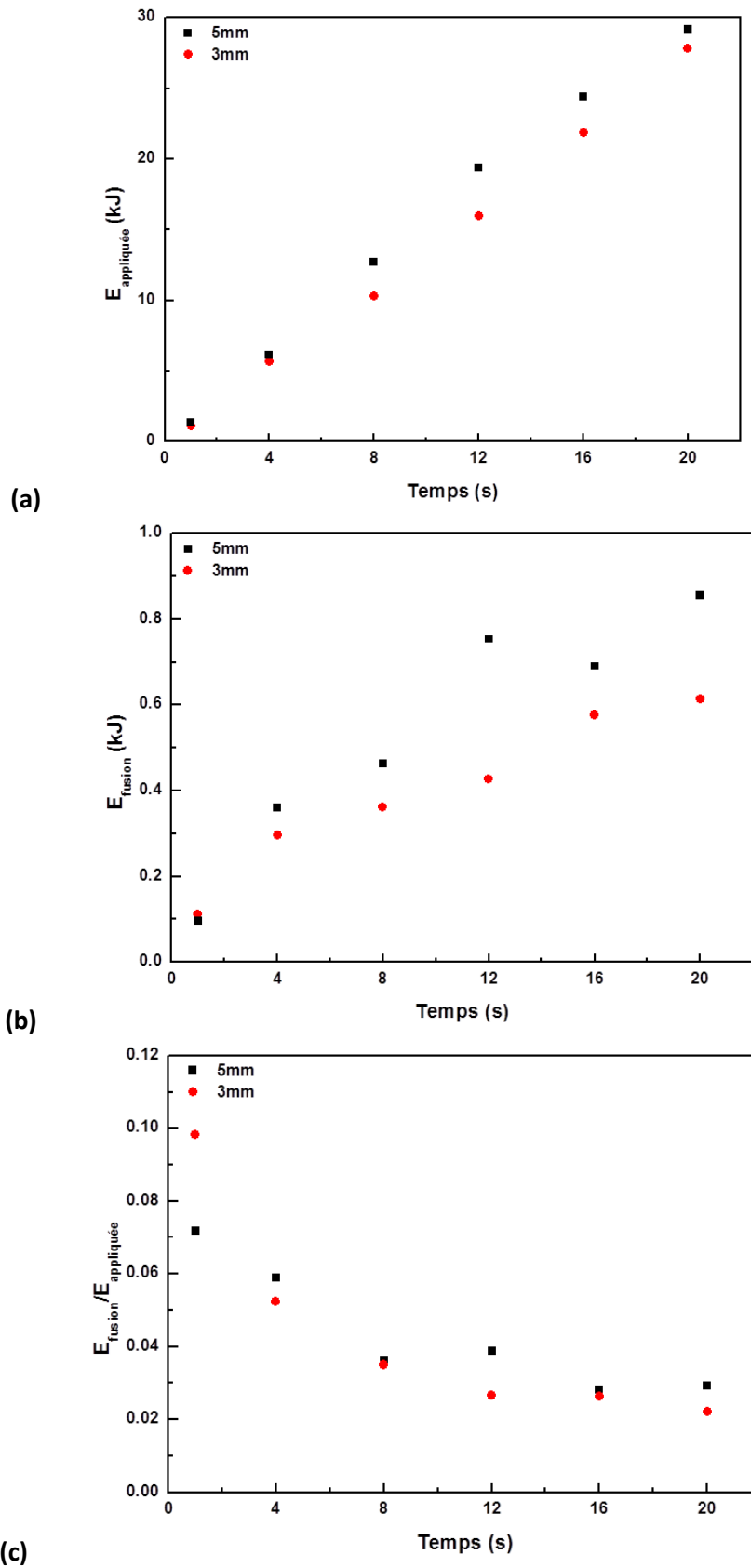
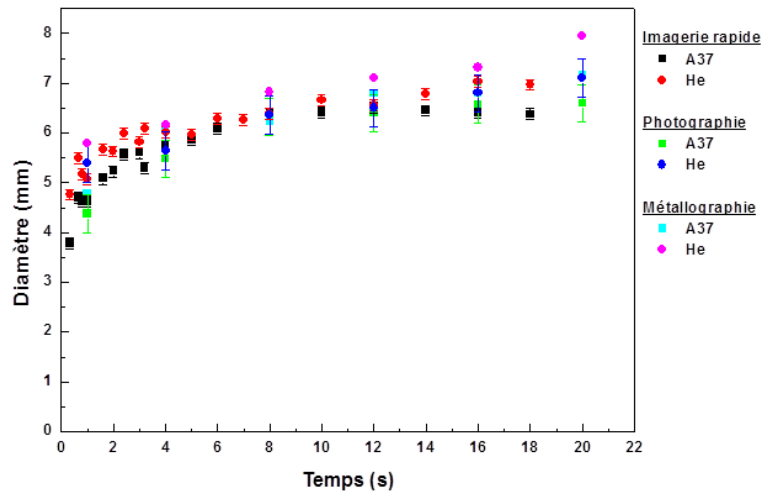


Figure 3.28 : (a) énergie appliquée en fonction du temps (b) énergie nécessaire à la fusion du métal en fonction du temps (c) part d'énergie appliquée consacrée à la fusion pour les deux longueur d'arc considérées

### Influence de la nature du gaz

Dans cette section, l'influence de la nature du gaz sur l'expansion du bain métallique, sur la forme de la zone fondue et sur les énergies mises en jeu dans le processus sont analysées. Pour cela, les cas n°3 et 4 ont été comparés, le seul paramètre modifié étant la nature du gaz. La *figure 3.29* présente l'évolution du diamètre des bains pour un arc d'Arcal37 et un arc d'hélium. Pour ces deux gaz, l'expansion du bain suit le même comportement : une augmentation rapide du diamètre sur la première seconde suivie d'un ralentissement de l'expansion. Les diamètres obtenus lors de l'interaction avec un arc d'hélium sont légèrement plus élevés. Toutefois, l'écart sur les valeurs constaté entre les deux gaz reste peu marqué.



*Figure 3.29 : Evolution du diamètre du bain en fonction du temps pour un plasma de longueur 5mm sous une intensité de 100A dans deux gaz différents (angle d'affûtage de la cathode 60°)*

La *figure 3.30(a)* regroupe les profils de bain obtenus pour les deux gaz entre 1 et 20 secondes. Les profils représentés en pointillés correspondent au cas n°3, soit lors de l'utilisation de l'Arcal37 et les profils tracés en trait plein au cas n°4, soit pour l'utilisation de l'hélium. L'analyse de ces profils montre que la forme de la zone fondue est modifiée par le changement de la nature du gaz. Il avait été observé des renflements de chaque côté du profil lors de l'interaction avec un arc d'Arcal37 de longueur 3mm qui disparaissent pour donner lieu à des profils plus « carré » dans le cas d'une interaction avec un arc d'hélium. L'expansion rapide du diamètre de la zone fondue sur les premiers instants et des valeurs de diamètres légèrement plus élevées lors de l'emploi d'hélium, comme l'avait montré l'analyse de la *figure 3.29*, se retrouvent également sur cette figure. Les profondeurs sont par ailleurs beaucoup plus importantes avec l'utilisation d'hélium mais la stabilisation qui avait pu être constatée pour le cas n°3 semble moins marquée. Ces constats sont plus facilement observables sur la *figure 3.30 (b)* où les diamètres et profondeurs des bains mesurés sur les images réalisées au microscope ont été tracés. La valeur limite pour le diamètre est de l'ordre de  $7.94 \pm 0.02 \text{ mm}$  (resp.  $7.16 \pm 0.02 \text{ mm}$ ) et la profondeur maximale atteinte est de  $4.57 \pm 0.02 \text{ mm}$  (resp.  $3.40 \pm 0.02 \text{ mm}$ ) avec l'hélium (resp. l'Arcal37). La *figure 3.30(c)* décrit l'évolution du rapport profondeur/diamètre de la zone fondue en fonction du temps. Ce rapport n'évolue pas tout à fait de la même manière selon la nature du gaz. Alors qu'il se stabilise autour de 0.50 dans le cas n°3, le

rapport semble continuer à augmenter dans le cas n°4 indiquant que, contrairement au diamètre, la profondeur de pénétration ne tend pas vers une valeur limite. Cela avait été également observé sur la *figure 3.30(a)*. Dans les configurations étudiées ici, il est possible que ce changement dans la nature du gaz induise une augmentation de la pénétration. L'hélium produisant un milieu plus énergétique, la distribution de température pourrait être modifiée en surface du bain par rapport à l'utilisation d'Arcal37 modifiant ainsi le sens des courants de Marangoni, les rendant pénétrants. Là encore une mesure de température serait nécessaire pour vérifier cette hypothèse. À cela, s'ajouterait l'augmentation des mouvements résultant des forces électromagnétiques puisque certaines études ont montré que la vitesse maximale de la convection engendrée par les forces de Lorentz augmentait lors du passage d'argon à l'hélium [Tan07].

Comme cela a été détaillé dans le *paragraphe II.2*, les profils de la zone fondue ont permis de déterminer le volume de métal fondu et de comparer les énergies mises en jeu pour les deux configurations. La *figure 3.31* présente l'évolution des différentes énergies calculées en fonction du temps. L'énergie appliquée augmente linéairement au cours du temps quelle que soit la nature du gaz indiquant que la puissance reste constante et que la quantité de vapeurs produite n'est pas modifiée dans le temps. Par ailleurs, l'énergie appliquée dans le cas n°4 est plus importante étant donné que la tension d'arc est plus importante dans l'hélium (de l'ordre de 18V) que dans l'Arcal37 (de l'ordre de 14V). Après 20 secondes d'interaction, un écart de 7.3kJ est constaté entre les deux configurations. L'énergie de fusion mise en jeu dans le cas n°4 est plus importante puisque les volumes de métal fondu sont plus imposants dans le cas de l'utilisation d'hélium (*figure 3.30(b)*). Dans les deux cas, une diminution dans la part d'énergie appliquée consacrée à la fusion (*figure 3.30(c)*) est constatée avec des valeurs légèrement supérieures dans l'hélium. Cela semblerait indiquer que les pertes par radiation, conduction ou évaporation, sont un peu plus faibles lors de l'utilisation d'hélium conduisant à une meilleure efficacité.

### Conclusions

L'influence de la nature du gaz sur l'expansion du diamètre du bain métallique, sur la géométrie de la zone fondue et sur les énergies impliquées dans le procédé a été évaluée. Il semblerait que la modification de la nature du gaz soit un paramètre influant sur le volume de la zone fondue, notamment sur la profondeur de pénétration qui est plus importante lors de l'emploi d'hélium, quel que soit le temps d'interaction. Ces effets peuvent être expliqués par la modification de la prédominance des mouvements pénétrants du bain liquide lors de l'utilisation d'un gaz plasmagène plus énergétique tel que l'hélium.

**Intensité 100A – Longueur de l'arc 5mm – Angle d'affûtage de la cathode 60°**

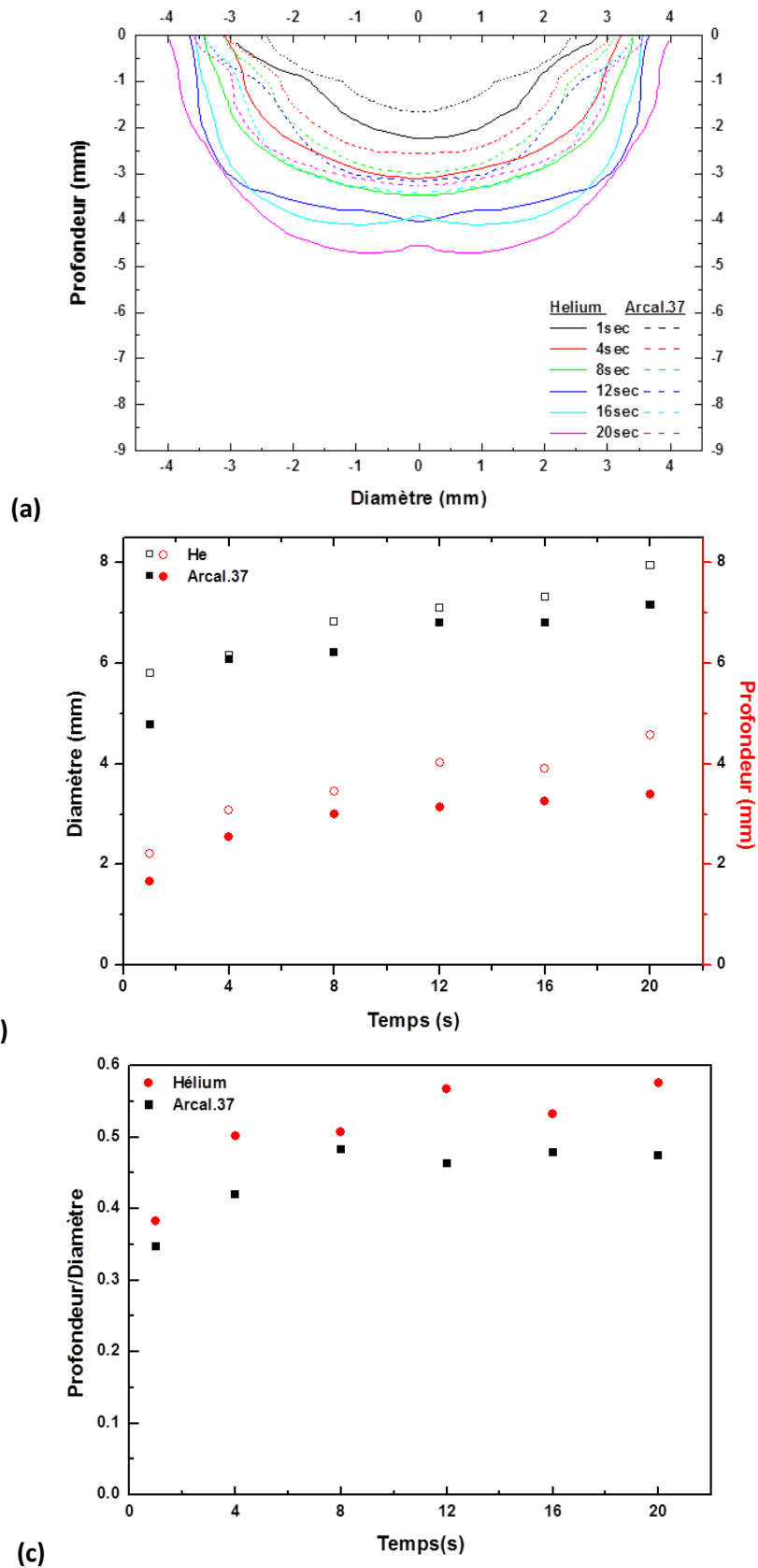


Figure 3.30 : (a) profils de la zone fondue (b) diamètres et profondeurs mesurés (c) évolution du rapport profondeur/diamètre pour les deux gaz considérés

**Intensité 100A – Longueur de l'arc 5mm – Angle d'affûtage de la cathode 60°**

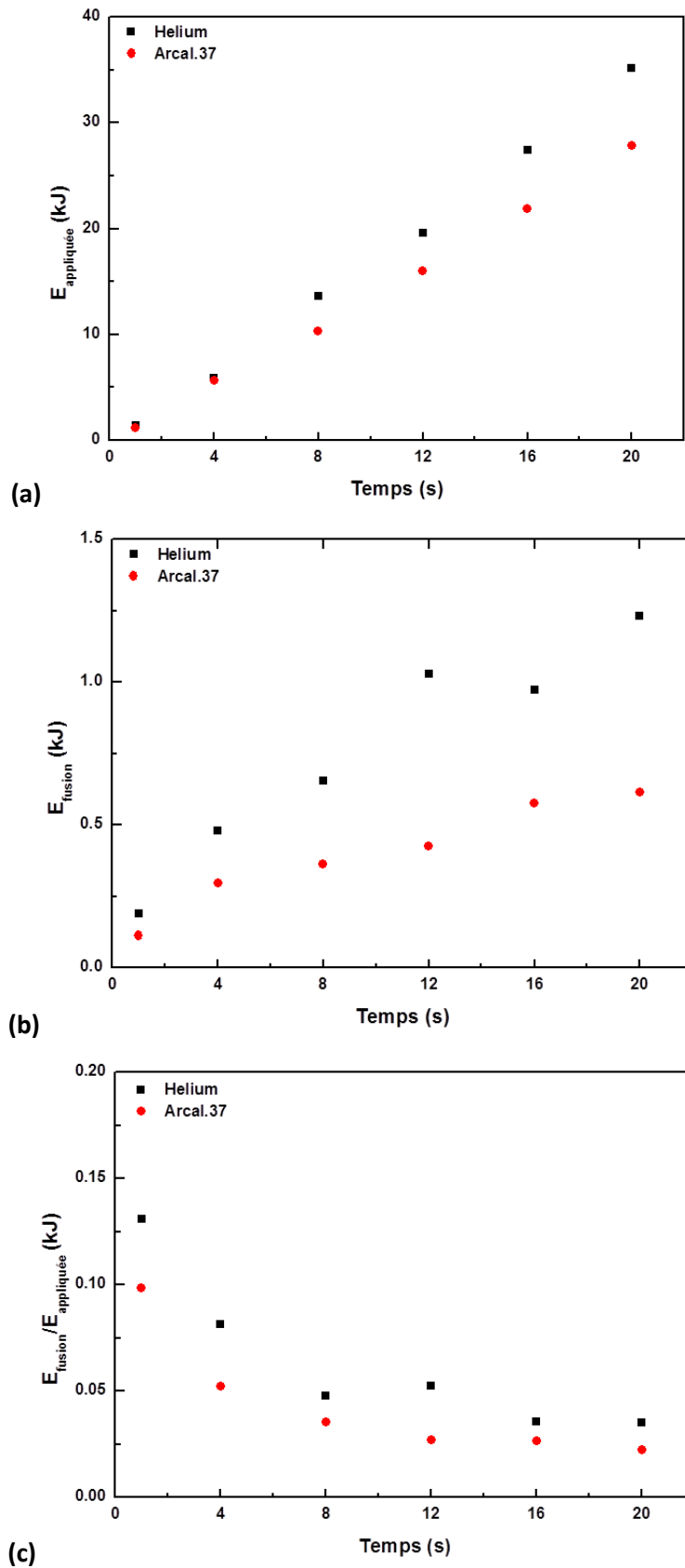


Figure 3.31 : (a) énergie appliquée en fonction du temps (b) énergie nécessaire à la fusion du métal en fonction du temps (c) part d'énergie appliquée consacrée à la fusion pour les deux gaz considérés



### **Influence de l'angle de cathode**

Dans cette section, l'influence de l'angle d'affûtage de la cathode sur l'expansion du bain métallique, sur la forme de la zone fondue et les énergies mises en jeu dans le processus est analysée. Pour cela, les cas n°1 et 5, 3 et 6, 4 et 7 ont été comparés. La *figure 3.32* présente l'évolution du diamètre des bains pour un arc d'Arcal37 de longueur 5mm (*figure 3.32(a)*) et 3mm (*figure 3.32(b)*) et un arc d'hélium de longueur 3mm (*figure 3.32(c)*) avec des angles d'affûtage de 60 et 30 degrés. Comme précédemment, le même comportement est observé en terme d'expansion du bain. Les valeurs de diamètres du bain dans l'Arcal37 semblent peu affectées par cette modification puisqu'un écart de 0.23mm (resp.0.35mm) est observé pour une longueur d'arc de 5mm (resp.3mm) lorsque l'angle d'affûtage est réduit. Cet écart étant de l'ordre de grandeur des incertitudes, il est difficile de conclure à un effet notable de ce paramètre. Dans le cas de l'hélium, les valeurs de diamètres sont plus affectées puisqu'un écart de 0.96mm est constaté.

La *figure 3.33(a)* regroupe les profils de bain obtenus pour les trois configurations à 20 secondes avec les deux angles d'affûtage utilisés. Les profils représentés en pointillés correspondent aux angles de 30° et les profils tracés en trait plein aux angles de 60°. L'analyse de ces profils montre que la forme du bain est légèrement modifiée par le changement d'angle de la cathode. Par exemple, les renflements qui avaient été observés de chaque côté du profil lors de l'interaction avec un arc d'Arcal37 de longueur 3mm sont toujours présents quel que soit l'angle utilisé ici mais la forme générale du bain apparaît plus « carrée ». Il en va de même dans le cas de l'Arcal37 de longueur 5mm où la forme de « bol » présente avec un angle de 60° laisse place à une forme plus cubique. Seule la forme des bains obtenus dans l'hélium reste équivalente lors du changement d'angle. Des valeurs de diamètres équivalents sont observées dans le cas de l'Arcal37, avec des valeurs légèrement supérieures lors de l'utilisation d'un angle de 30°. Ce constat ne se retrouve pas dans le cas de l'hélium où il est observé un diamètre supérieur avec un angle de 60°. Cette observation va à l'encontre de ce qui a été observé sur la *figure 3.32(c)* avec les mesures d'expansion du bain obtenues par imagerie rapide et par photographie. Il est possible qu'il y ait eu une erreur sur le centrage de la découpe ou lors de la réalisation du contour du profil sur les images. Ce point mériterait d'être vérifié. Les profondeurs sont par ailleurs plus importantes avec l'utilisation d'un angle de 30° quel que soit le gaz avec pour l'Arcal37 une influence plus marquée dans le cas de l'arc de longueur 5mm. Ces constats sont plus facilement observables sur la *figure 3.33(b)* où les diamètres et profondeur des bains mesurés sur les images réalisées au microscope ont été reportés en fonction de l'angle d'affûtage. La *figure 3.33(c)* décrit l'évolution du rapport profondeur/diamètre de la zone fondue en fonction de l'angle d'affûtage. Ce rapport diminue lorsque l'angle d'affûtage augmente quel que soit le cas concerné. Cette diminution est plus marquée dans le cas de l'hélium que dans les cas relatifs à l'Arcal37, puisqu'il a été observé un écart dans les pénétrations plus important. Par ailleurs, la tendance reste la même en augmentant l'angle d'affûtage : un rapport plus élevé dans l'hélium et plus faible dans un arc d'Arcal37 de longueur 3mm. Ceci pourrait indiquer que l'angle d'affûtage, dans la gamme étudiée ici, est un paramètre moins influant qu'une modification de la nature du gaz ou de la longueur d'arc. Comme pour les autres études, les profils de la zone fondue ont permis de déterminer le volume de métal fondu et de comparer les énergies mises en jeu

pour les deux configurations. La *figure 3.34* présente l'évolution des différentes énergies calculées en fonction du temps. L'énergie appliquée diminue lorsque l'angle d'affûtage augmente quel que soit le cas considéré (*figure 3.34(a)*). Ceci coïncide avec ce qui a été énoncé lors de l'étude bibliographique indiquant qu'une augmentation de l'angle d'affûtage induisait une diminution de la tension d'arc et donc une puissance appliquée plus faible. L'écart constaté entre les énergies appliquées lors du changement d'angle est de l'ordre de 2kJ. En ce qui concerne les énergies de fusion il a été observé sur les profils de bains que l'augmentation de l'angle d'affûtage diminuait la pénétration et dans le cas de l'Arcal37 venait également modifier la forme du bain. Ces changements se répercutent nécessairement dans le volume de métal fondu et donc dans le calcul de l'énergie de fusion. L'énergie de fusion diminue donc lorsque l'angle d'affûtage augmente (*figure 3.34(b)*). Le cas de l'hélium est à considérer avec précaution puisqu'il a été précisé que l'analyse par métallographie avait donné un diamètre de bain plus petit pour le cas n°7, allant à l'encontre des observations par imagerie rapide, induisant donc un volume calculé plus faible que ce qu'il devrait être. Cet écart se propage donc également dans la part d'énergie appliquée consacrée à la fusion représentée sur la *figure 3.34(c)*. Dans les autres cas, une diminution de cette part est constatée lorsque l'angle d'affûtage augmente. Cela semble indiquer que les pertes par radiation, conduction ou évaporation, sont un peu plus faibles lors de l'utilisation d'une pointe affûtée à 30° conduisant à une efficacité du procédé un peu meilleure.

### Conclusions

Ici, l'influence de l'angle d'affûtage de la cathode sur l'expansion du diamètre du bain métallique, sur la forme de la zone fondue et sur les énergies impliquées dans le procédé a été évaluée. Il semble que la modification de l'angle de la cathode soit un paramètre influant sur le volume de la zone fondue, notamment sur la profondeur de pénétration qui est plus importante lors de la diminution de l'angle. Ce paramètre apparaît toutefois moins déterminant que ne le sont la nature du gaz ou la longueur de l'arc.

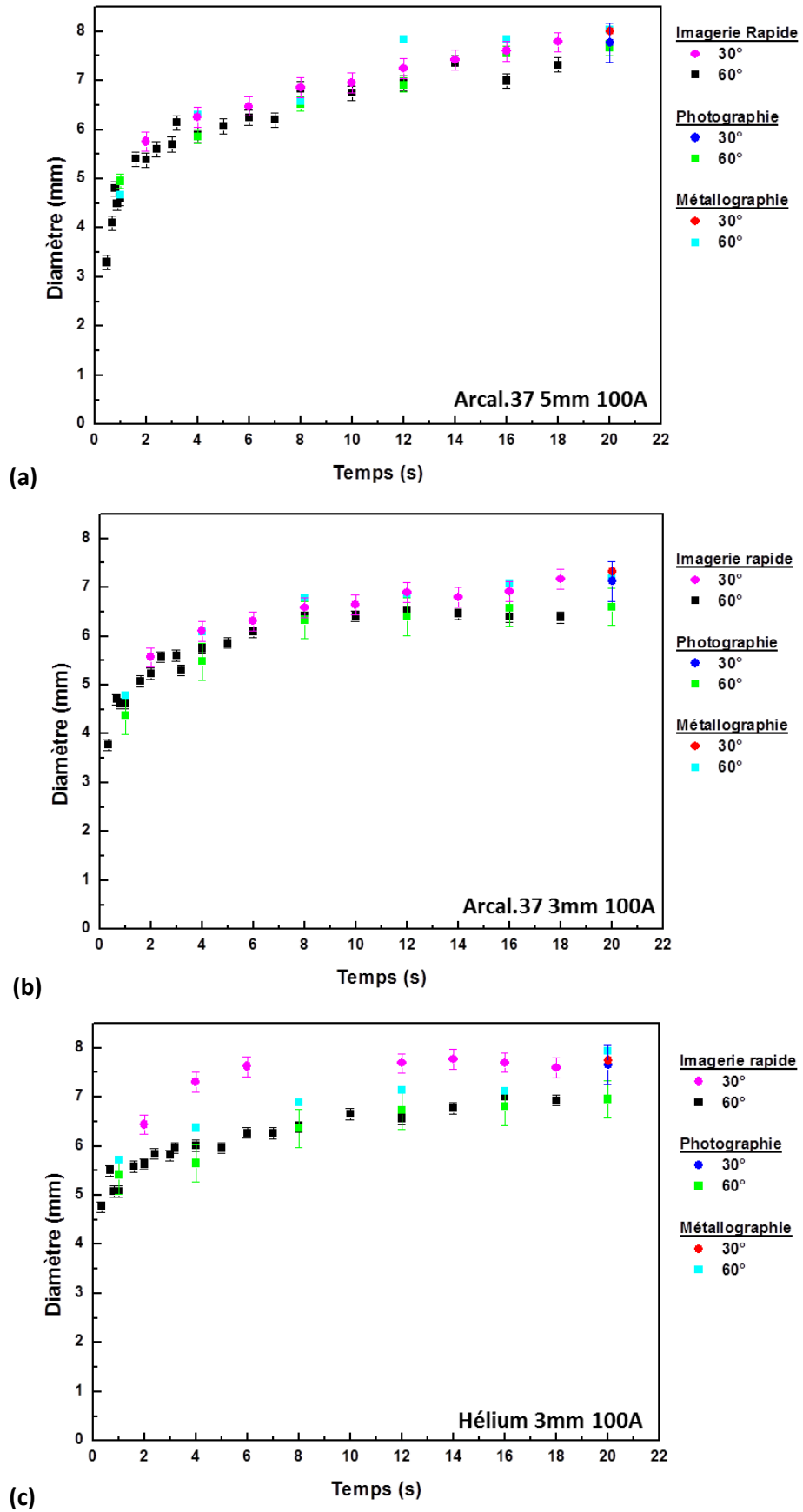


Figure 3.32 : Evolution du diamètre du bain en fonction du temps pour deux angles de cathode dans le cas d'un arc (a) d'Arcal37 de longueur 5mm (b) d'Arcal37 de longueur 3mm (c) d'hélium de longueur 3mm

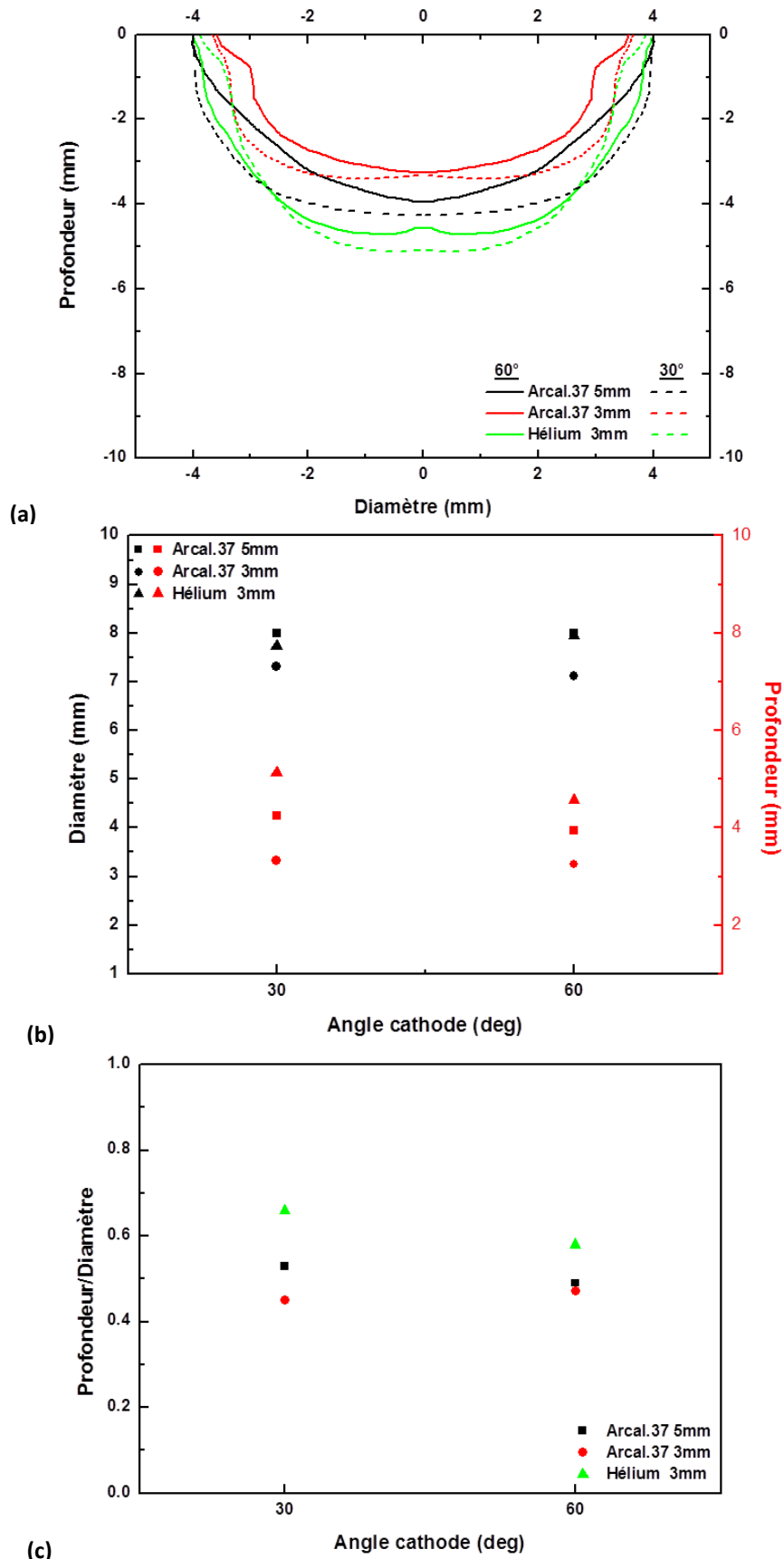


Figure 3.33 : (a) profils de la zone fondue (b) diamètres et profondeurs mesurées (c) évolution du rapport profondeur/diamètre pour les deux angles de cathode considérés

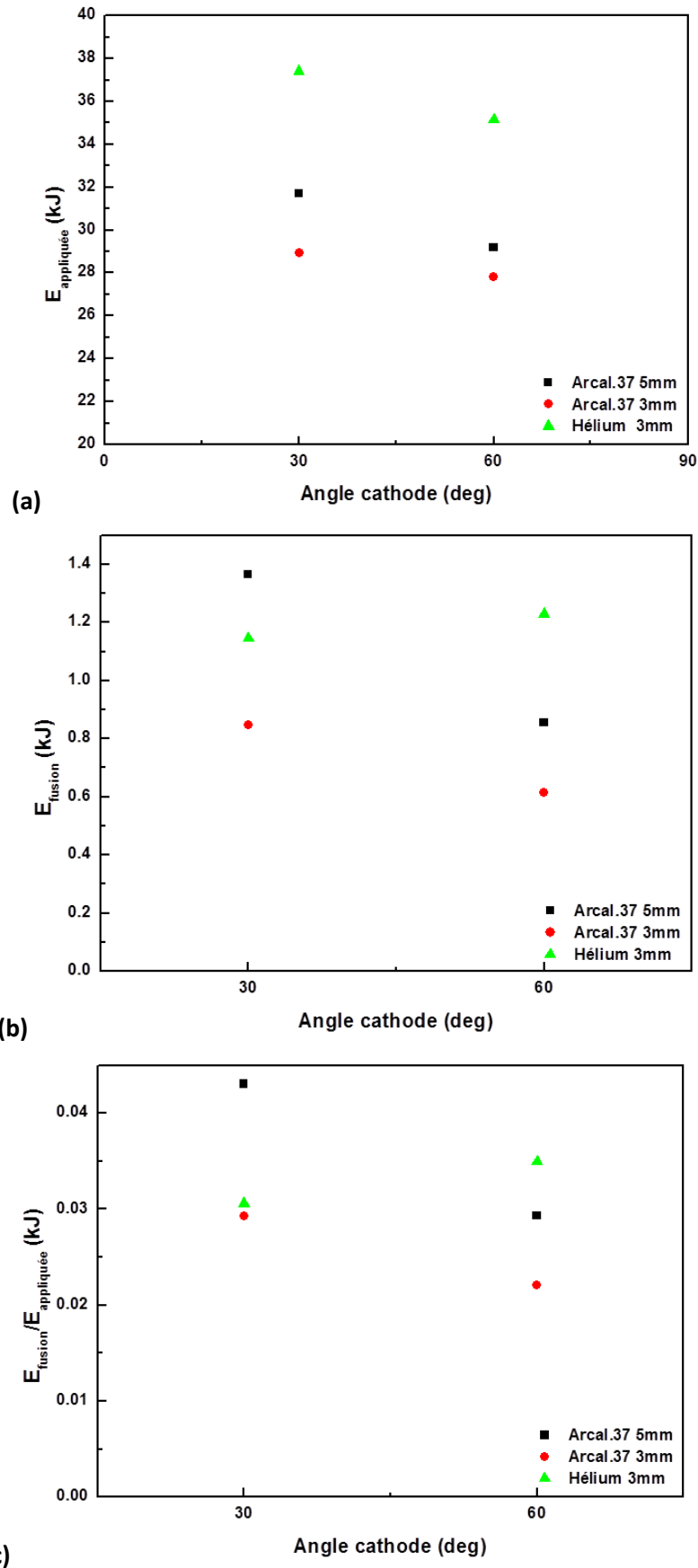


Figure 3.34 : (a) énergie appliquée en fonction du temps (b) énergie nécessaire à la fusion du métal en fonction du temps (c) part d'énergie appliquée consacrée à la fusion pour les deux angles de cathodes considérés

### Bilan

Dans ce paragraphe, les résultats concernant l'expansion du bain métallique, la forme de la zone fondue ainsi que les énergies mises en jeu pour différentes configurations ont été étudiées pour des temps d'interaction allant de 1 à 20 secondes. Les effets de quatre paramètres ont été analysés montrant qu'un des paramètres les plus influents était l'intensité du courant. Certains comportements sont toutefois plus difficiles à interpréter. En effet, il est difficile de conclure sur l'influence de l'angle d'affutage de la cathode car ses effets semblent également dépendants des autres paramètres (nature du gaz, longueur de l'arc). Néanmoins cette étude a permis de fournir des valeurs expérimentales pour différentes configurations. Les profils des zones fondues après 20 secondes d'interaction pour les différents cas sont présentés en *annexe 4*. À partir de ces observations, il semble également intéressant de noter que compte tenu des différentes formes de bain obtenues selon les paramètres opératoires employés, un raisonnement en terme de volume de la zone fondue plutôt qu'en terme de rapport D/W souvent trouvé dans la littérature serait pertinent lors des comparaisons entre modèles et expériences par exemple.

### IV. Conclusion

Ce chapitre consacré à l'étude du matériau après son interaction avec l'arc, a permis, à la suite d'une revue non exhaustive des travaux de la littérature, de présenter la mise en œuvre expérimentale pour la caractérisation de la zone fondue. Différentes grandeurs ont ainsi été obtenues par ces méthodes : l'évolution du diamètre et de la profondeur du bain métallique en fonction du temps, les volumes et la forme associés ainsi que les énergies impliquées dans le procédé (énergie appliquée, part d'énergie consacrée à la fusion). L'effet de différents paramètres opératoires a ensuite pu être analysé. Il a ainsi été mis en avant que l'intensité du courant avait une grande influence sur les diamètres et les pénétrations de bain obtenus mais ne modifiait pas la forme de la zone fondue. L'utilisation d'un gaz énergétique tel que l'hélium a une forte influence sur les pénétrations du bain et modifie le profil de la zone fondue. Le changement de la longueur de l'arc ne semble pas être un paramètre très influent sur les dimensions et la forme de la zone fondue, pour les longueurs qui ont été étudiées. Enfin, l'affûtage de l'angle de la cathode semble être un paramètre influent mais il est difficile de conclure sur ses effets du fait de l'interdépendance avec les autres paramètres. Certaines observations restent difficiles à interpréter et de nouvelles mesures seraient nécessaires pour venir confirmer ou invalider les hypothèses quant à l'interprétation de certains résultats. Il serait par exemple intéressant de réaliser des mesures de température en surface du bain de manière à avoir des informations supplémentaires sur le sens des mouvements de Marangoni selon les conditions opératoires utilisées. Des mesures calorimétriques et de flux rayonné pourraient également permettre de compléter le bilan énergétique mis en place dans ces travaux et d'améliorer la compréhension du transfert d'énergie entre l'arc et le matériau. Par ailleurs, les travaux relatifs à l'influence des paramètres opératoires n'ont pas été réalisés à puissance constante, l'alimentation de la torche TIG ne permettant pas ce type de réglage. Une attention particulière pourrait également être portée à ce point lors de futurs travaux afin de préciser l'effet de ces paramètres. Enfin, quatre paramètres ont été étudiés ici compte tenu du temps imparti à la

réalisation de ces travaux de thèse. L'extension de cette étude à une plage de variations plus importantes (pour des intensités comprises entre 50 et 300A par exemple), ainsi qu'à d'autres paramètres impliqués lors du processus de soudage tels que le débit de gaz ou la nature du matériau viendrait compléter le jeu de données obtenu et participerait à une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans la formation et la géométrie de la soudure qui en résulte.

\*\*\*

# Conclusions et perspectives

Ces travaux de thèse ont été consacrés à la mise en place de méthodes permettant d'étudier et de caractériser l'interaction entre plasma et matériau sur une torche de soudage TIG. Les points suivants, faisant chacun l'objet d'un chapitre, ont été abordés :

- *l'étude du plasma par spectroscopie d'émission* : ce point a nécessité le dimensionnement et la mise en place d'un système optique. Grâce à ce dispositif, les températures présentes au sein d'un plasma d'Arcal37 ont été déterminées. Une température maximale de 21064K (resp. 23942K) a été estimée dans le cas de l'interaction d'un plasma d'Arcal37 de longueur 5mm avec un acier 304L sous une intensité de 100A (resp. 150A). La production de vapeurs métalliques inhérentes au procédé TIG, a été étudiée de manière qualitative à partir de l'intensité de trois raies du fer. Ceci a permis d'analyser la distribution de vapeurs de fer le long de l'axe de la décharge montrant que la quantité de vapeurs était maximale à environ 1.5mm de la surface de l'anode, pour le gaz et la gamme de courant étudiés. La distribution des vapeurs de fer a également été analysée dans le temps, mettant en avant une stabilisation dans leur production après quelques secondes d'interactions. Les perspectives de ce travail ont été évoquées avec notamment l'analyse quantitative des vapeurs métalliques qui ensemencent le milieu plasma et l'étude de l'influence d'autres paramètres opératoires tel que la longueur de l'arc, la nature du gaz ou l'angle d'affûtage de la pointe de cathode.
- *l'étude de l'interface arc-liquide* : cette partie a été réalisée par imagerie rapide. Pour cela, des améliorations sur la configuration TIG ont dû être apportées avec notamment l'utilisation d'une source lumineuse pour obtenir des images de qualité. Des méthodes de traitement des données ont été développées. La première méthode s'appuie sur la différence de phase obtenue par transformée de Fourier des signaux extraits en deux points de l'image. La seconde consiste à suivre l'évolution de l'intensité des pixels sur un segment d'image. Ces outils ont d'abord été validés sur une configuration simplifiée avant d'être appliquées à la configuration TIG. Ces deux méthodes ont permis d'estimer des valeurs de vitesses en surface d'un bain métallique d'acier en interaction avec un plasma d'hélium sous une intensité de 100A puis 150A. Des vitesses de l'ordre de  $0.75 \pm 0.08 \text{m.s}^{-1}$  pour une intensité de 100A et de  $0.95 \pm 0.10 \text{m.s}^{-1}$  pour une intensité de 150A ont été obtenues. Des propositions d'améliorations ont été mentionnées avec par exemple l'utilisation d'une source monochromatique pour une meilleure visualisation des mouvements en surface du bain métallique surtout dans le cas de l'interaction avec un plasma très rayonnant du type argon ou Arcal.



- *l'étude du matériau après son interaction avec l'arc* : ce point a été analysé par métallographie. L'observation au microscope de l'intérieur du matériau, reflet des contraintes qu'il a subies pendant la phase d'arc, a permis d'étudier dans une première partie l'évolution du bain durant 20 secondes. A ces découpes a été associée l'observation de l'expansion de la surface du bain métallique par imagerie rapide et par observation photographique. Ces trois outils ont montré une bonne corrélation dans les résultats obtenus. Il a ainsi été observé que l'expansion du bain, en termes de diamètre et profondeur, était rapide sur les premiers instants et ralentissait pour se stabiliser après quelques secondes d'interaction. Ce phénomène a été expliqué par la prédominance de la part électrique du flux transféré à l'anode sur celle par conduction durant les premiers instants. Dans une seconde partie, l'effet de différents paramètres opératoires (intensité du courant, longueur de l'arc, nature du gaz, angle d'affûtage de la cathode) sur la forme de la zone fondue a été évaluée. Parmi les paramètres opératoires étudiés, l'intensité du courant apparaît comme le paramètre ayant le plus d'influence sur les dimensions de la zone fondue, les diamètres et pénétrations augmentant notablement avec l'intensité. Aucune influence sur la forme du bain n'a été constatée. L'allongement de l'arc, quant à lui, influence les dimensions de la zone fondue et modifie sa forme. Enfin, l'emploi d'hélium par rapport à l'Arcal37 ainsi que la diminution de l'angle d'affûtage génèrent des bains dont la pénétration plus marquée alors que la forme des bains n'apparaît pas modifiée. Pour les cas étudiés, une estimation de l'énergie nécessaire pour faire fondre le métal ainsi que la part d'énergie injectée correspondante ont également été proposés, permettant d'établir une partie du bilan énergétique associé au procédé. Ce bilan nécessiterait d'être complété par une estimation des pertes par évaporation du matériau et de rayonnement (plasma et matériau). Par ailleurs, l'utilisation d'outils pour visualiser la zone affectée thermiquement et son évolution selon les conditions opératoires permettrait de se rapprocher des problématiques industrielles.

Dans les différents chapitres les résultats obtenus ont été comparés aux travaux de la littérature et il a été montré que les comparaisons s'avéraient souvent délicates du fait de l'écart observé dans les conditions opératoires. Néanmoins, ces résultats ont pu être comparés à ceux proposés par le modèle théorique de notre équipe qui se rapproche le plus de notre configuration, même si une différence au niveau de la forme de la cathode persiste. Ce type de modèles développés autour d'une configuration de soudage a pour objectif d'être prédictif. Il est alors possible de se demander dans quelle mesure les résultats expérimentaux peuvent l'être. Les mesures qui ont été réalisées pour ces travaux ont été effectuées sur une torche TIG en position statique. Cette position est éloignée de la configuration réelle mais il était nécessaire de s'affranchir de ce paramètre qui, lors d'une première approche, complexifie la mise en œuvre expérimentale. De plus, l'utilisation d'une configuration statique permet de confronter les résultats au modèle théorique de l'équipe. Une torche de soudage TIG fonctionnant à une intensité de 100A se déplace à une vitesse de l'ordre de  $3\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dans ces conditions, les épaisseurs de métal soudé sont d'environ 1.5mm. À cette intensité,

le diamètre de l'arc relatif au flux électrique, qui est la composante majoritaire du flux transféré à l'anode, est estimée à 4mm. Un point du matériau ne voit le flux électrique que pendant 1 seconde. En 1 seconde, à 100A, nos résultats montrent que la profondeur du bain atteint 1.54mm. Cette pénétration correspond à l'ordre de grandeur des épaisseurs de métal soudé dans ces conditions. Pour être prédictif expérimentalement à cette intensité, il faudrait donc s'intéresser aux résultats obtenus sur la première seconde.

Ces travaux sont un premier pas dans la caractérisation expérimentale du procédé. Il serait par la suite intéressant de réaliser toutes ces mesures de manière synchrone. Ainsi, un lien entre la forme du bain de soudure, les vitesses en surface, la quantité de vapeurs émises, la température de l'arc et le bilan énergétique associé pourrait être réalisé. Ceci permettrait de comprendre plus en profondeur le couplage entre tous ces éléments. Ce type d'études pourrait être ensuite étendu à l'influence des paramètres opératoires sur les soudures obtenues.

\*\*\*



# Références

- [Air1] Air Liquide « Dossier soudage TIG et Plasma : amélioration de la productivité en soudage » [www.airliquidewelding.com](http://www.airliquidewelding.com).
- [Air2] Air Liquide « TOPTIG, un nouveau procédé de soudage robotisé pour l'industrie » [www.airliquidewelding.com](http://www.airliquidewelding.com).
- [Air3] Air Liquide « Procédés plasma et TIG : application de soudage automatique » [www.airliquidewelding.com](http://www.airliquidewelding.com).
- [Ash65] D Ashby et al « Performance of the He-Ne gas laser in an interferometer for measuring plasma density » *Journal of Applied Physics*, 1965.
- [Bac13] B Bachmann et al « High speed tridimensional plasma temperature determination of axially symmetric free burning arcs » *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2013.
- [Ber12] A Bertier et al « TIG and ATIG experimental investigations and comparison to simulation - Part I : Identification of Marangoni effect » *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2012.
- [Bro09] M Brochard « Modèle couple cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG » *Thèse de doctorat (Université de Provence, Aix-Marseille)*, 2009.
- [Bor13] D Borel « Étude numérique et expérimentale des transferts thermiques dans un plasma d'arc – Application au soudage à l'arc TIG » *Thèse de doctorat (Université de Rouen, Rouen)*, 2013.
- [Caz80] R Cazes « Soudage à l'arc - Soudage à l'électrode réfractaire » *Techniques de l'Ingénieur*, 1980.
- [Cho91] RT Choo et J Szekely « The effect of gas shear stress on Marangoni flows in arc welding » *Welding Research Supplement*, 1991.
- [Cou95] JF Coudert, MP Planche et P Fauchais « Velocity measurement of dc plasma jets based on arc root fluctuations » *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1995.
- [Dal14] M Dal, P Le Masson et M Carin « A model comparison to predict heat transfer during spot GTA welding » *International Journal of Thermal Sciences*, 2014.
- [Don11] W Dong et al « GTAW liquid pool convection and variations of weld shape under helium gas shielding » *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011.
- [Esa1] ESAB « A propos d'Esab », [www.esab.com](http://www.esab.com).
- [Esa2] ESAB « Guide pratique du procédé TIG », [www.esab.com](http://www.esab.com).
- [Esa3] ESAB « Problèmes et défauts de soudage : causes et remèdes », [www.esab.com](http://www.esab.com).
- [Esp91] DC Espinosa « Visualisation of gas tungsten arc weld pools » *Mémoires de Master (Naval Postgraduate School Monterey, USA)*, 1991.
- [Ete85] K Etemadi et E Pfender « Impact of Anode Evaporation on the Anode Region of a High Intensity Argon Arc » *Plasma chemistry and plasma processing*, 1985.
- [Fan96] H Fan et Y Shi « Numerical simulation of the arc pressure in gas tungsten arc welding » *Journal of Materials processing technology*, 1996.

- [Far86] A Farmer, G Haddad et L Cram «Temperature determinations in a free burning arc : III. Measurements with molten anodes» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 1986.
- [Fre02] P Freton «Etude d'un arc de découpe par plasma d'oxygène, Modélisation – expérience » *Thèse de doctorat (Université Paul Sabatier, Toulouse)*, 2002.
- [Gon93] JJ Gonzalez et al «Mathematical modelling of a free-burning arc in the presence of metal vapor» *Journal of Applied Physics*, 1993.
- [Gon97] JJ Gonzalez et al «The influence of iron vapour on an argon transfered arc» *Plasma Sources Science and Technology*, 1997.
- [Goo98] M Goodarzi, R Choo et JM Toguri «The effect of tip angle» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 1998.
- [Gre99] G Gregori et al «Thomson scattering measurements in atmospheric plasma jets» *Physical Review E*, 1999.
- [Had84] G Haddad et A Farmer «Temperature determinations in a free-burning arc : I. Experimental techniques and results in argon» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 1984.
- [Hen05] P Henrikson « Visualisation of weld pool surface flow during TIG welding of stainless steel 316L plates » *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, 2005.
- [Hli96] J Hlina et V Nenicka « Investigations of plasma jet oscillations using FFT and resulting phase angle relations » *Acta Technica CSAV*, 1996.
- [How00] D Howse et W Lucas « An investigation into arc constriction by active fluxes for TIG (A-TIG) » *Science and Technology of Welding and Joining*, 2000.
- [Hsu83] KC Hsu, K Etemadi et E Pfender « Study of the freeburning highintensity argon arc» *Journal of Applied Physics*, 1983.
- [Jaf91] SM Jaffe, J Larjo et R Henberg « Abel inversion using the fast fourier transform» *Xth international Symposium on Plasma Chemistry (Bochum)*, 1991.
- [Kaf79] H Kafrouni et al «Temporal change of particle densities and temperatures in a decaying arc discharge » *Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer*, 1979.
- [Kan11] N Karunakaran et V Balasubramanian «Effect of pulsed current on temperature distribution, weld bead profiles and characteristics of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011.
- [Kou13] K Koudadje « Étude expérimentale et numérique de la modélisation du bain de fusion en soudage d'acier de teneur en éléments tensioactifs différentes» *Thèse de doctorat (Université de Provence, Aix-Marseille)*, 2013.
- [Lag04] F Lago et al «A numerical modelling of an electric arc and its interactions with the anode : Part I. The two-dimensionnal model» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2004.
- [Lan11] E Langlois-Bertrand « Caractérisation d'un jet de plasma d'argon laminaire : détermination des champs de températures par spectroscopies atomique et moléculaire et mesure des vitesses d'écoulement » *Thèse de doctorat (Université d'Orléans, Orléans)*, 2010.

- [Leg10] E Leguen « Étude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique » *Thèse de doctorat (Université de Bretagne Sud,)*, 2010.
- [Les90] A Lesage, JL Lebrun et J Richou «Temperature dependance of Stark parameters for Fel lines» *The Astrophysical Journal*, 1990.
- [Li10] D Li et al « Weld pool shape variations and electrode protection in double shielded TIG welding » *Advanced Materials Research*, 2010.
- [Lim04] L Liming, W Jifeng et G Song « Hybrid laser–TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy » *Materials Science and Engineering*, 2004.
- [Len06] X Leng, G Zhang et L Wu « The characteristic of twin-electrode TIG coupling arc pressure » *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2006.
- [Low92] JJ Lowke, P Kovitya et HP Schmidt «Theory of free burning arc columns including the influence of the cathode» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 1992.
- [Lu02] S Lu et al « Weld Penetration and Marangoni Convection with Oxide Fluxes in GTA Welding» *Materials Transactions*, 2002.
- [Lu08] S Lu, H Fujii et K Nogi « Marangoni convection and weld shape variation in He-CO<sub>2</sub> shielded gas tungsten arc welding on SUS304 stainless steel» *Journal of Material Science*, 2008.
- [Mas05] M Masquère «Etude du transfert d'énergie entre un arc et un matériau» *Thèse de doctorat (Université Paul Sabatier, Toulouse)*, 2005.
- [Mat88] A Matsunawa et al « Model experiments of weld pool convection and penetration shape in TIG arc welding » *International Institute of Welding*, 1988.
- [Mer73] JM Mermet et JP Robin « Étude de l'inversion d'Abel en vue de la mesure de la répartition de la température dans un plasma inductif » *Revue Internationale des Hautes Températures et des réfractaire*, 1973.
- [Mes04] RW Messler «Principle of welding» *Wiley*, 2004.
- [Mil90] KC Mills et BJ Keene «Factors affecting variable weld penetration» *International Materials Reviews*, 1990.
- [Mil98] KC Mills et al «Marangoni effects in welding» *Philosophical Transactions : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998.
- [Mil06] Miller Electric Manufacturing Company, «Welding and the world of metals», [www.millerwelds.com](http://www.millerwelds.com).
- [Mod00] P Modenesi, R Apolibario et N Peirera, «TIG welding with single component fluxes» *Journal of Materials Processing Technology*, 2000.
- [Mou13-a] J Mougnot « Modélisation entre un arc électrique et un matériau : application au soudage TIG » *Thèse de doctorat (Université Paul Sabatier, Toulouse)*, 2013.
- [Mou13-b] J Mougnot et al « Plasma-weld pool interaction in tungsten inert gas configuration » *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2013.

- [Mur09] AB Murphy et al «Modelling of thermal plasmas for arc welding : the role of the shielding gas properties and of metal vapour» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2009.
- [Mur10] AB Murphy et al «Modelling of arc welding : the importance of including the arc plasma in the computational domain» *Vacuum*, 2010.
- [Mur11] AB Murphy «A self-consistent three-dimensional model of the arc, electrode and weld pool in gas-metal arc welding» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2011.
- [Nes62] O Nestor « Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs » *Journal of Applied Physics*, 1962.
- [Ols59] HN Olsen « Thermal and electrical properties of an argon plasma » *The Physics of Fluids*, 1959.
- [Pel96] S Pellerin et al « Stark width of ArI transition (696.543nm) » *Journal of Physics B : Atomic, Molecular and Optical physics*, 1996.
- [Per00] N Perry « Étude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables» *Thèse de doctorat (Ecole Centrale de Nantes)*, 2000.
- [Rab04] H Rabat et C De Izarra, « Check of OH rotational temperature usinf an interferometric method », *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2004.
- [Ram11] R Ramanantsoa et al «Experimental quantification of the transient heat flux transferred to the electrodes in a carbon nanotubes synthesis reactor » *Journal of Physics : conference series*, 2011.
- [Raz95] M Razafinimanana et al « Experimental study of the influence of anode ablation on the characteristics of an argon transferred arc » *Plasma sources and science technology*, 1995.
- [Rok93] SI Rokhlin et AC Guu, « Study of arc force, pool depression and weld penetration during gas tungsten arc welding » *Welding research supplement*, 1993.
- [Sny94] SC Snyder «Electron temperature and electron density profiles in an atmospheric pressure argon plasma jet» *Physical Review E*, 1994.
- [Son07] HS Song et YS Zhang « Three dimensional reconstruction of specular surface for a gas tungsten arc weld pool» *Measurements Sciences and Technology*, 2007.
- [Son11] G Song et Z Luo « The influence of laser pulse waveform on laser–TIG hybrid welding of AZ31B magnesium alloy» *Optics and Lasers in Engineering*, 2011.
- [Ste80] W Steen « Arc augmented laser processing of materials » *Journal of Applied Physics*, 1980.
- [Tan02] M Tanaka et al « A unified numerical modelling of stationnary tungsten inert gas welding process» *Metallurgical and materials transactions*, 2002.
- [Tan07] M Tanaka et JJ Lowke «Predictions of weld pool profiles using plasma physics» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2007.
- [Tan08] M Tanaka et al «Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding» *Science and technology of welding and joining*, 2008.

- [Tan10] M Tanaka et al «Time dependent calculations of molten pool formation and thermal plasma with metal vapour in gas tungsten arc welding» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2010.
- [Ter02] H Terasaki, M Tanaka et MUshio «Effects of metal vapor on electron temperature in helium gas tungsten arcs» *Metallurgical and materials transactions*, 2002.
- [Tor03] J Torres et al «An easy way to determine simultaneously the electronic density and temperature in high pressure plasma by Stark broadening» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2003.
- [Tra11] A Traidia et F Roger « Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding » *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011.
- [Tsa85] N Tsai et T Eagar « Distribution of the heat and current fluxes in gas tungsten arcs » *Metallurgical Transactions B*, 1985.
- [Tse11] K Tseng et C Hsu «Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds» *Journal of Materials Processing Technology*, 2011.
- [Vac00] S Vacqu   «L'arc électrique » *CNRS Edition*, 2000.
- [Val07] F Valensi «Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG» *Thèse de doctorat (Université d'Orléans, Orléans)*, 2007.
- [Wem12] K Weman « Procédés de soudage » *Dunod*, 2012.
- [Zha09a] CX Zhao «Measurements of fluid flow in weld pool» *Thèse de doctorat (Delphie University of Technology, Pays-Bas)*, 2009.
- [Zha09b] CX Zhao et al «A stereo vision method for tracking particle flow on the weld pool surface» *Journal of Applied Physics*, 2009.
- [Zhu95] P Zhu et al «Prediction of anode temperatures of free burning arcs» *Journal of Physics D : Applied Physics*, 1995.



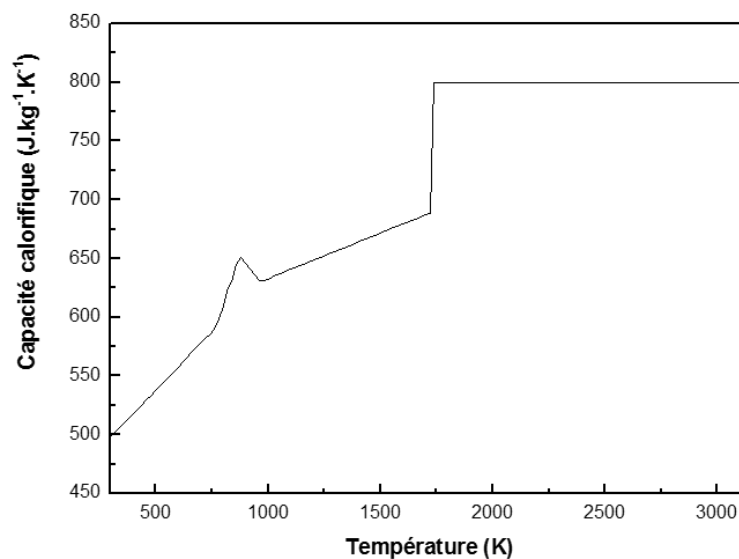


# Annexes



## 1. Choix d'une température limite pour le calcul de l'énergie consacrée à la fusion du métal

Le profil de la zone fondue obtenue à partir des observations au microscope numérique permet de déterminer le volume de métal correspondant ainsi que l'énergie nécessaire à la fusion d'un tel volume. Comme cela a été présenté au *paragraphe II.2 du Chapitre 3*, la capacité calorifique de l'acier 304L est fonction de la température. La figure ci-dessous présente cette dépendance. Les valeurs pour cette grandeur sont issues des données utilisées par *Mougenot* dans ses travaux de modélisation [Mou13-a].



*Figure A1.1 : Capacité calorifique de l'acier 304L en fonction de la température*

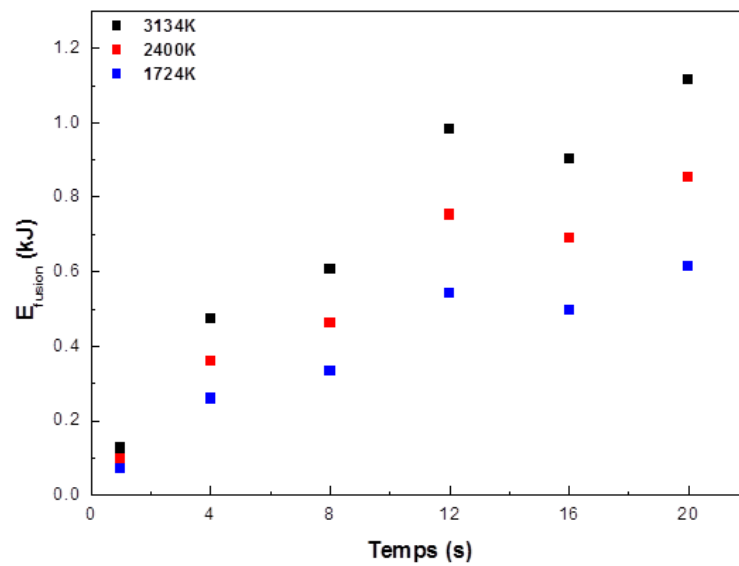
La capacité calorifique de l'acier 304L augmente en fonction de la température. Une forte augmentation est observable à 1724K correspondant au passage de la phase solide à liquide. Cette température sera appelée température d'ébullition  $T_{éb}$ . La capacité calorifique atteint en suite une valeur limite jusqu'à la température 3134K. Au-delà, les données ne sont pas disponibles mais cette température marque le passage de la phase liquide à vapeur. Elle sera appelée température de vaporisation  $T_{vap}$ .

L'expression de l'énergie de fusion est rappelée :

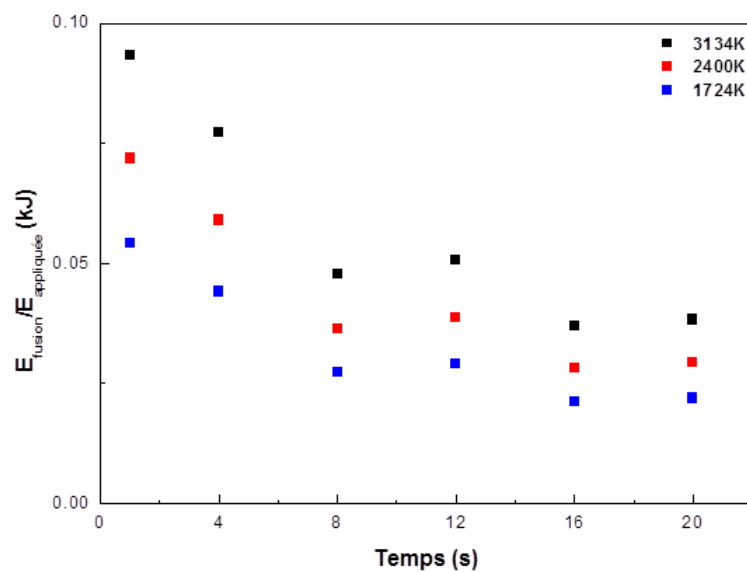
$$E_{fusion} = m \int_{300K}^{2400K} C_p(304L)dT + mL_f \quad (II.2.2)$$

Les calculs ont été effectués pour une température limite de 2400K, comprise entre la température d'ébullition et de vaporisation. À titre de comparaison, l'énergie consacrée à la fusion a été calculée pour les deux températures limites :  $T_{éb}$ ,  $T_{vap}$ .

La figure A1.2 présente l'énergie de fusion (figure A1.2(a)) et la part d'énergie consacrée à la fusion (figure A1.2(b)) en fonction du temps pour les différentes températures limites dans le cas de l'interaction d'un arc d'Arcal37 avec un acier 304L sous une intensité de 100A.



(a)



(b)

*Figure A1.2 : (a) énergie nécessaire à la fusion du métal en fonction du temps (b) part d'énergie appliquée consacrée à la fusion pour les trois températures limites considérées*

L'énergie de fusion et la part consacrée à la fusion présentent la même évolution pour les trois températures limites. En effet, dans cette gamme de température, la capacité calorifique évolue de manière constante. La seule différence notable porte donc sur les valeurs d'énergies mises en jeu. Par ailleurs, l'énergie de fusion du métal est évaluée à partir du volume de métal fondu. Dans un tel volume, il est difficile d'affirmer que la totalité du volume se trouve à la température d'ébullition ou d'évaporation. Le choix s'est donc porté sur une température intermédiaire.

## 2. Détail des grandeurs estimées (1)

Le tableau regroupe les valeurs de diamètres, de profondeur et le rapport profondeur sur diamètre pour tous les cas étudiés avec les différentes méthodes utilisées. L'en-tête grisée indique le nom du cas et les paramètres opératoires correspondant. Le nom des méthodes ainsi que leurs incertitudes respectives pour la mesure du diamètre et de la profondeur sont précisés. Pour alléger les tableaux de valeurs, les diamètres mesurés aux temps intermédiaires par imagerie rapide ne sont pas indexés. Il a été précisé au cours du *chapitre 3* que le paramétrage de la caméra rapide ne permettait pas de réaliser une série d'image à l'instant final : les croix apparaissant dans le tableau matérialisent donc les mesures qui n'ont pas pu être effectuées.

Cas n°1 – Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d'arc 5mm – Angle d'affutage 60°							
		t=1sec	t=4sec	t=8sec	t=12sec	t=16sec	t=20sec
Diamètre (mm)	Imagerie rapide ( $\pm 0.15$ )	4.60	5.89	6.83	6.94	6.99	
	Photographie ( $\pm 0.15$ )	4.95	5.86	6.52	6.91	7.55	7.66
	Métallographie ( $\pm 0.02$ )	4.00	6.40	6.57	7.72	7.58	8.04
Profondeur (mm)	Métallographie ( $\pm 0.02$ )	1.54	2.83	3.22	3.81	3.92	3.95
Ratio profondeur/diamètre		0.39	0.44	0.49	0.50	0.50	0.49
Cas n°2 – Arcal37 – Intensité 150A – Longueur d'arc 5mm – Angle d'affutage 60°							
		t=1sec	t=4sec	t=8sec	t=12sec	t=16sec	t=20sec
Diamètre (mm)	Imagerie rapide ( $\pm 0.15$ )	6.38	8.55	9.45	10.20	10.25	
	Photographie ( $\pm 0.15$ )	5.93	8.58	9.05	9.88	10.59	10.77
	Métallographie ( $\pm 0.02$ )	6.02	8.16	9.10	10.15	10.56	10.50
Profondeur (mm)	Métallographie ( $\pm 0.02$ )	1.50	3.30	4.27	4.99	5.48	5.92
Ratio profondeur/diamètre		0.25	0.40	0.46	0.49	0.52	0.56
Cas n°3 – Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d'arc 3mm – Angle d'affutage 60°							
		t=1sec	t=4sec	t=8sec	t=12sec	t=16sec	t=20sec
Diamètre (mm)	Imagerie rapide ( $\pm 0.11$ )	4.62	5.75	6.39	6.51	6.40	
	Photographie ( $\pm 0.38$ )	4.38	5.48	6.33	6.40	6.58	6.60
	Métallographie ( $\pm 0.02$ )	4.78	6.08	6.22	6.80	6.80	7.16
Profondeur (mm)	Métallographie ( $\pm 0.02$ )	1.66	2.55	3.00	3.15	3.25	3.25
Ratio profondeur/diamètre		0.35	0.42	0.48	0.46	0.48	0.47
Cas n°4 – Hélium – Intensité 100A – Longueur d'arc 3mm – Angle d'affutage 60°							
		t=1sec	t=4sec	t=8sec	t=12sec	t=16sec	t=20sec
Diamètre (mm)	Imagerie rapide ( $\pm 0.11$ )	5.08	6.01	6.39	6.55	7.00	
	Photographie ( $\pm 0.38$ )	5.40	5.65	6.36	6.73	6.80	6.95
	Métallographie ( $\pm 0.02$ )	5.80	6.16	6.82	7.10	7.32	7.94
Profondeur (mm)	Métallographie ( $\pm 0.02$ )	2.22	3.09	3.46	4.03	3.9	4.57
Ratio profondeur/diamètre		0.39	0.44	0.49	0.50	0.50	0.49

Cas n°5 – Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d’arc 5mm – Angle d’affutage 30°							
		t=1sec	t=4sec	t=8sec	t=12sec	t=16sec	t=20sec
Diamètre (mm)	Imagerie rapide ( $\pm 0.20$ )		6.25	6.86	7.25	7.60	
	Photographie ( $\pm 0.40$ )						7.77
	Métallographie ( $\pm 0.02$ )						8.00
Profondeur (mm)	Métallographie ( $\pm 0.02$ )						4.25
Ratio profondeur/diamètre							0.53
Cas n°6 – Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d’arc 3mm – Angle d’affutage 30°							
		t=1sec	t=4sec	t=8sec	t=12sec	t=16sec	t=20sec
Diamètre (mm)	Imagerie rapide ( $\pm 0.20$ )		6.11	6.58	6.90	6.92	
	Photographie ( $\pm 0.40$ )						7.12
	Métallographie ( $\pm 0.02$ )						7.32
Profondeur (mm)	Métallographie ( $\pm 0.02$ )						3.32
Ratio profondeur/diamètre							0.45
Cas n°7 – Hélium – Intensité 100A – Longueur d’arc 3mm – Angle d’affutage 30°							
		t=1sec	t=4sec	t=8sec	t=12sec	t=16sec	t=20sec
Diamètre (mm)	Imagerie rapide ( $\pm 0.20$ )		7.30		7.69	7.70	
	Photographie ( $\pm 0.40$ )						7.65
	Métallographie ( $\pm 0.02$ )						7.74
Profondeur (mm)	Métallographie ( $\pm 0.02$ )						5.12
Ratio profondeur/diamètre							0.66

### 3. Détail des grandeurs estimées (2)

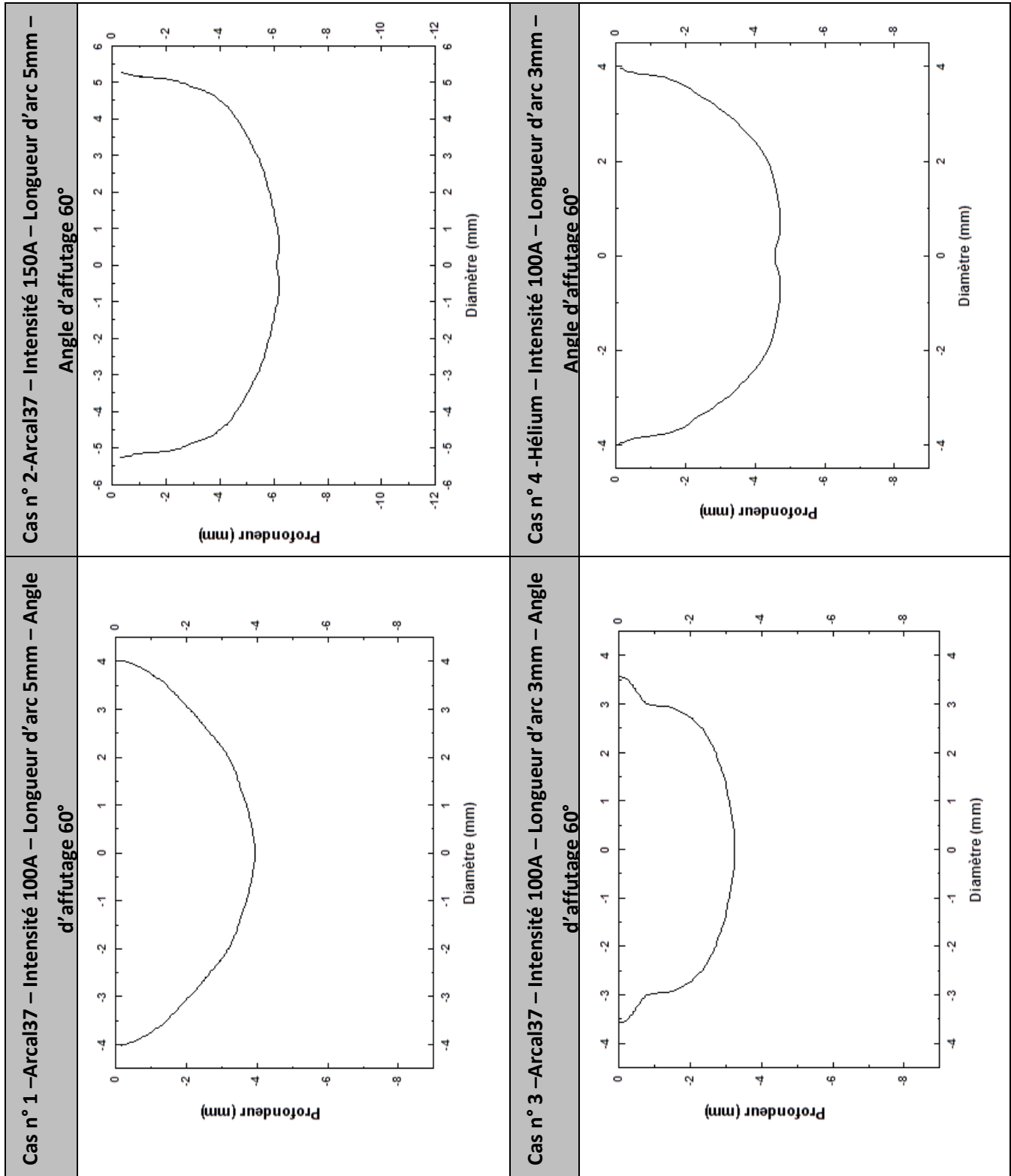
Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs de volume de métal fondu déterminées à partir des profils de la zone fondue, la masse de métal correspondante ainsi que les énergies impliquées pour les différents cas étudiés. Toutes ces grandeurs, dont l'obtention est décrite au *paragraphe II.2* du *Chapitre 3*, sont issues des images obtenues au microscope par métallographie.

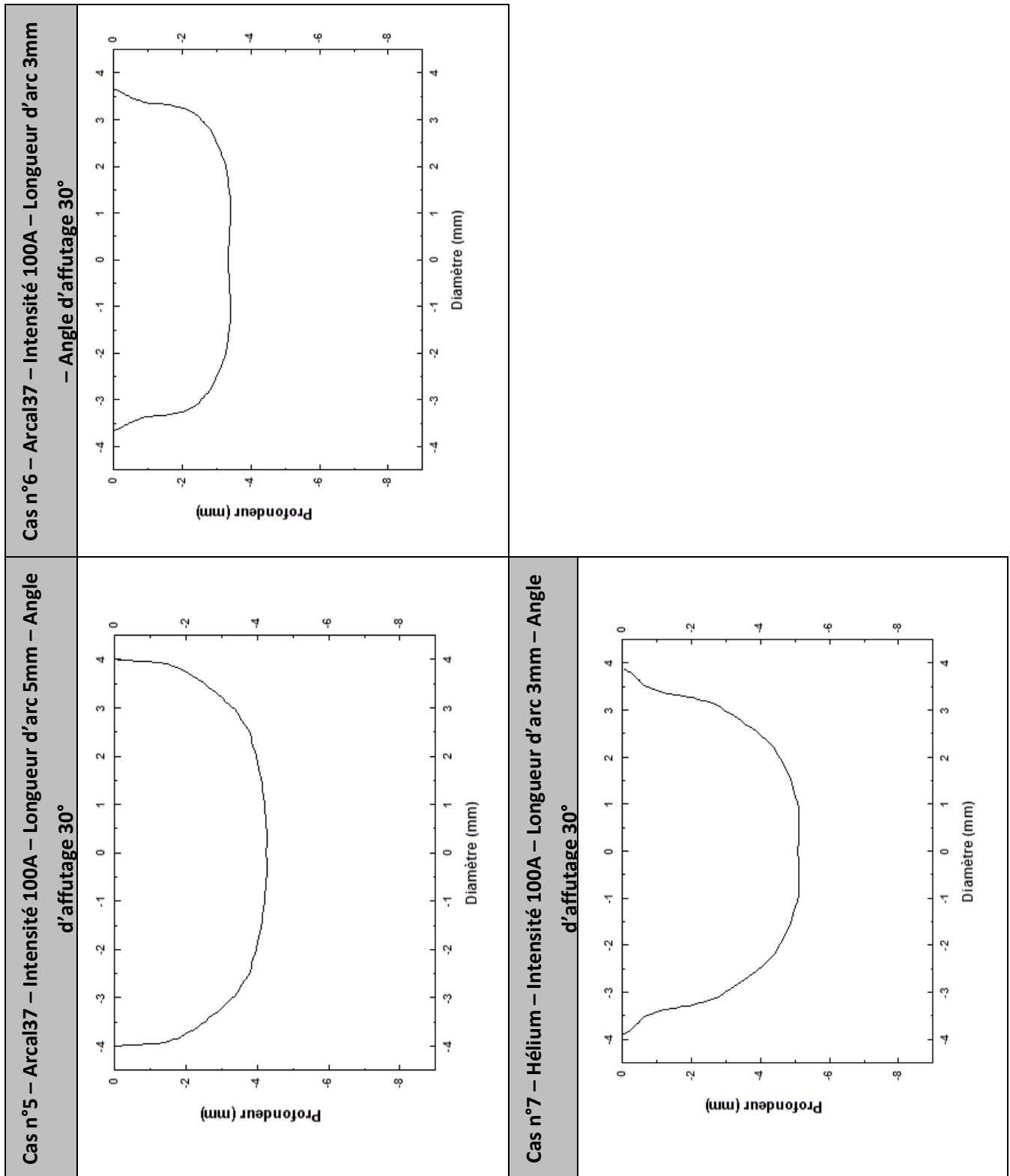
Cas n° 1 – Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d'arc 5mm – Angle d'affutage 60°							Cas n° 5 - Angle d'affutage 30°
	t= 1 s	t= 4 s	t= 8 s	t= 12 s	t= 16 s	t= 20 s	t= 20 s
Volume (mm <sup>3</sup> )	12.19	45.34	58.09	94.50	86.63	107.34	171.54
Masse (g)	0.10	0.36	0.46	0.75	0.68	0.85	1.36
E <sub>fusion</sub> (kJ)	0.097	0.361	0.462	0.752	0.690	0.854	1.365
E <sub>appliquée</sub> (kJ)	1.35	6.12	12.70	19.40	24.42	29.18	31.7
Cas n° 2-Arcal37 – Intensité 150A – Longueur d'arc 5mm – Angle d'affutage 60°							
	t= 1 s	t= 4 s	t= 8 s	t= 12 s	t= 16 s	t= 20 s	
Volume (mm <sup>3</sup> )	18.83	79.56	159.5	259.9	367.3	380.64	
Masse (g)	0.16	0.63	1.26	2.05	2.9	3.01	
E <sub>fusion</sub> (kJ)	0.15	0.630	1.27	2.07	2.9	3.03	
E <sub>appliquée</sub> (kJ)	2.4	10	19.4	28.73	37	45.7	
Cas n° 3 – Arcal37 – Intensité 100A – Longueur d'arc 3mm – Angle d'affutage 60°							Cas n° 6 - Angle d'affutage 30°
	t= 1 s	t= 4 s	t= 8 s	t= 12 s	t= 16 s	t= 20 s	t= 20 s
Volume (mm <sup>3</sup> )	14.07	37.25	45.52	53.59	72.45	77.10	106.49
Masse (g)	0.11	0.29	0.36	0.42	0.57	0.61	0.84
E <sub>fusion</sub> (kJ)	0.111	0.297	0.362	0.427	0.577	0.614	0.85
E <sub>appliquée</sub> (kJ)	1.14	5.68	10.32	15.96	21.88	27.82	28.94
Cas n° 4 -Hélium – Intensité 100A – Longueur d'arc 3mm – Angle d'affutage 60°							Cas n° 7 - Angle d'affutage 30°
	t= 1 s	t= 4 s	t= 8 s	t= 12 s	t= 16 s	t= 20 s	t= 20 s
Volume (mm <sup>3</sup> )	23.54	60.15	82.00	129.28	122.8	154.55	143.86
Masse (g)	0.19	0.48	0.65	1.02	0.97	1.22	1.14
E <sub>fusion</sub> (kJ)	0.187	0.478	0.652	1.029	0.972	1.23	1.145
E <sub>appliquée</sub> (kJ)	1.43	5.87	13.65	19.57	27.44	35.15	37.42



#### 4. Profils de la zone fondue selon le cas étudié

Les profils de la zone fondue après 20 secondes d'interaction pour les différents cas étudiés ont été regroupés ici. Seuls sont tracés les profils au temps maximal puisqu'il a été montré au cours du *Chapitre 3* que le temps d'interaction n'avait pas d'influence sur la forme du profil obtenu.









## **Étude expérimentale du mouvement hydrodynamique d'un bain métallique et de sa production de vapeurs sur une configuration de soudage TIG**

### **Résumé :**

Le soudage à électrode réfractaire, plus souvent appelé TIG (*Tungsten Inert Gas*), est un procédé dans lequel un arc électrique est généré entre une électrode en tungstène et les pièces à souder sous un flux gazeux inerte. Le transfert d'énergie entre l'arc et l'anode donne naissance à un bain métallique et à la production de vapeurs. La qualité des soudures obtenues est directement liée au comportement du plasma et aux phénomènes physiques présents dans le bain métallique (effets Marangoni, force de traînée, gravité, forces de Laplace, conduction thermique...).

L'objectif de ces travaux de thèse est de mettre en place des méthodes de diagnostic permettant une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans le transfert d'énergie lors de l'interaction arc-matériau sur une configuration de soudage TIG. Il s'agit également d'évaluer et d'analyser l'influence de certains paramètres opératoires impliqués dans le procédé (nature du gaz, intensité du courant, longueur de l'arc...) sur ces mécanismes. Plusieurs axes de recherche ont été dégagés :

- l'étude de la colonne plasma pour estimer sa température selon les paramètres opératoires utilisés ;
- l'étude de l'interface arc-liquide pour la compréhension des phénomènes de brassage et d'écoulement dans le liquide ainsi que l'influence des vapeurs métalliques issues de l'érosion du matériau sur le plasma ;
- l'étude du matériau après son interaction avec l'arc pour faire le lien entre le brassage dans le bain durant le procédé et les caractéristiques de la zone fondue observée après solidification.

L'équipe Arc Électrique et Procédés Plasmas Thermiques (AEPPT) du laboratoire LAPLACE s'intéresse à ces phénomènes d'interaction arc-matériau par le biais de la modélisation et de l'expérience. Un modèle 3D a été récemment développé au sein de notre équipe sur cette thématique. La caractérisation expérimentale du procédé devrait permettre également d'apporter des éléments de validation aux modèles déjà existants.

### **Mots-clés :**

Arc électrique	Soudage TIG
Spectroscopie d'émission	Vapeurs métalliques
Imagerie rapide	Bain métallique
Métallographie	Zone fondue