



HAL
open science

Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG

Flavien Valensi

► **To cite this version:**

Flavien Valensi. Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG. Physique [physics]. Université d'Orléans, 2007. Français. NNT : . tel-00449180

HAL Id: tel-00449180

<https://theses.hal.science/tel-00449180>

Submitted on 21 Jan 2010

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.



UNIVERSITE D'ORLEANS

THESE PRESENTEE A L'UNIVERSITE D'ORLEANS
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'ORLEANS

Discipline : Physique des plasmas

PAR

VALENSI Flavien

Titre de la Thèse : Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG

Soutenue le : 19 décembre 2007

MEMBRES DU JURY :

	(Fonction/Etablissement)	
- M. Guy CERNOGORA	Université Versailles (France)	/ Président
- Mme Khadija BOUHAEF	USTHB Alger (Algérie)	/ Rapporteur
- M. Daniel MORVAN	ENSC Paris (France)	/ Rapporteur
- M. Francis BRIAND	CTAS-Air Liquide (France)	
- M. Charles DE IZARRA	Université d'Orléans (France)	
- Mme Nadia PELLERIN	Université d'Orléans (France)	/ co-Encadrante
- M. Stéphane PELLERIN	Université d'Orléans (France)	/ Directeur de thèse

Titre Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG

Mots clés Soudage, Plasma, Spectroscopie, Analyse MEB, Imagerie rapide

Résumé Le procédé de soudage MIG-MAG repose sur l'utilisation d'un arc électrique pour transférer des gouttes de métal fondu d'une électrode consommable (l'anode) vers la pièce à souder (la cathode) sous protection gazeuse contrôlée. Différents régimes de transfert peuvent exister, selon le choix notamment du courant et la composition du gaz de protection : le régime pulvérisation axiale, préféré par les utilisateurs, est obtenu pour un courant suffisamment élevé sous argon seul ; Pour un courant plus faible ou lorsque du CO₂ est ajouté en quantité suffisante dans le gaz, le transfert devient globulaire, de moindre qualité.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est de définir les conditions permettant d'obtenir le régime de pulvérisation axiale pour le taux de CO₂ dans le gaz de protection le plus élevé possible et/ou un courant d'arc le plus faible possible. Les travaux réalisés sont basés sur l'observation de l'arc par imagerie rapide pour déterminer les conditions de la transition entre les deux régimes de soudage. Le diagnostic de la colonne de plasma a été réalisé par spectroscopie optique d'émission en utilisant une méthode originale donnant accès à la température et la densité électronique sans hypothèse sur l'état d'équilibre du milieu. Les résultats obtenus ont permis de déterminer la répartition des vapeurs métalliques dans la colonne pour différents régimes de fonctionnement.

L'analyse en microscopie électronique à balayage de l'électrode consommable a permis de comprendre les phénomènes se produisant aux électrodes lors de la transition entre les régimes globulaires et de pulvérisation axiale. En particulier, il s'avère que les éléments minoritaires de l'acier constituant l'électrode consommable ont une grande influence sur les résultats obtenus, et que leur contrôle permet une amélioration significative des performances du procédé de soudage.

Title Contribution to study of phenomena related to anodic and cathodic effects in GMAW

Keywords Welding, Plasma, Spectroscopy, SEM analysis, High-speed visualisation

Abstract The gas metal arc welding (GMAW) process is based on the use of an electric arc to transfer melted metal droplets from a consumable electrode (the anode) to the welded plate (the cathode) under controlled shielding gas. Various transfer modes can occur, according in particular to the choice of the welding current and shielding gas composition. The spray transfer mode, that users prefer, is obtained for a high enough current under pure argon; For a lower current or when CO₂ is added in the gas in sufficient concentration, the transfer becomes globular, with a lower quality.

The purpose of the work presented in this memoir is to define the conditions allowing to get the spray transfer mode for the highest possible CO₂ concentration in the shielding gas and/or the lowest possible arc current value. The study is based on high-speed arc image observation to characterize the conditions of transition between the two transfer modes. The plasma column diagnosis has been carried on by optic emission spectroscopy using an original method leading to get electronic temperature and density without hypothesis on the equilibrium state of the plasma. The data obtained allowed to map the metallic vapours repartition in the column for various working modes.

Scanning electron microscopy analysis of the consumable electrode led to the understanding of the phenomenon occurring at electrodes during the transition between globular and spray transfer modes. In particular, it appears that the alloying elements present in consumable electrode's steel have a large influence on the obtained results and that their control allows a significant improvement of the welding process performances.

Discipline – spécialité doctorale Physique des plasmas

Intitulé et adresse du laboratoire

LASEP : Laboratoire d'Analyse Spectroscopique et d'Energétique des Plasmas – UPRES EA 3269
Université d'Orléans, Faculté des Sciences – Site de Bourges

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Centre Universitaire de Bourges de l'Université d'Orléans, au Laboratoire d'Analyses Spectroscopiques et d'Energétique des Plasmas (LASEP) : je remercie Monsieur le Professeur Olivier VALLEE, responsable du LASEP, et tout spécialement Monsieur le Professeur Charles DE IZARRA, responsable de l'Antenne Scientifique Universitaire de Bourges, pour m'avoir permis de travailler au sein de leur établissement, et m'avoir apporté un soutien permanent.

Je souhaite remercier Monsieur Francis BRIAND pour la confiance qu'il m'a accordé en me permettant de réaliser ma thèse avec le groupe Air Liquide. J'espère que mon travail lui a donné satisfaction et qu'il débouchera sur quelques avancées par rapport aux problèmes étudiés.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes rapporteurs, Madame le Professeur Khadidja BOUHAFEF et Monsieur le Professeur Daniel MORVAN, pour avoir, malgré mon retard, accepté mon mémoire et avoir remis leur rapport dans les délais en dépit de la difficulté que cela imposait.

Je tiens à remercier très sincèrement Monsieur le Professeur Guy CERNOGORA d'avoir accepté de participer au jury, bien que la demande lui en ait été faite tardivement.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Stéphane PELLERIN de m'avoir proposé ce sujet de thèse et de m'avoir permis de le mener à bien jusqu'à sa conclusion. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour sa patience, son sincère dévouement et son optimisme constant au cours de ces trois années durant lesquelles il a dirigé mes travaux. Je remercie également Madame Nadia PELLERIN pour avoir assuré le co-encadrement de ma thèse, pour son aide, sa gentillesse et sa patience.

Sans leur soutien à tous les deux je n'aurais pu mener ce travail à son terme.

Je souhaite également remercier Monsieur Amar BOUTAGHANE, avec qui j'ai travaillé durant un an au laboratoire, pour son aide, son amitié, sa bonne humeur et ses conseils judicieux. Sa collaboration a été plus que précieuse pour finaliser le travail réalisé.

Je remercie toute l'équipe du CTAS avec qui j'ai travaillé durant ces trois années, en particulier M. PLOTTIER pour son assistance et son aide pour toutes mes questions concernant le poste de soudage, M^{lle} GALAND, pour la réalisation des fils de soudage que j'ai utilisés lors de mes travaux, M^{me} CHOVET et M. SCHORR pour leur disponibilité et leur aide dans les analyses au MEB et en microscopie optique, M. BILLON pour la réalisation

des analyses des matériaux, M. FLOROS pour son aide et ses conseils, et MM. BRIAND (à nouveau) et RICHARD pour les fructueuses discussions que nous avons pu avoir régulièrement.

Je tiens également à remercier toutes les personnes du Centre Universitaire de Bourges avec qui j'ai eu l'occasion de travailler durant ma thèse, en particulier Gilles CHARLES dont l'assistance technique m'a été utile plus d'une fois. Sans oublier Sylvia ZIELINSKA qui, à mon arrivée au laboratoire m'a initié au soudage et au dispositif expérimental qu'elle avait développé.

J'associe à ces remerciements M. VERON, du CRMHT, pour m'avoir permis de réaliser les études au microscope électronique à balayage de l'IRAMAT à Orléans.

Je remercie de même M. MILLOT, du CRMHT, pour ses conseils et son aide qui m'ont été précieux.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues thésards et aux stagiaires avec qui j'ai eu l'occasion de travailler et avec qui j'ai eu d'intéressantes discussions : Jérémy, Patrick, Boris, Emilie, Jean François

Je souhaite enfin remercier mes proches, mes parents Anne et Josselin et mon frère Cédric, pour m'avoir soutenu et aidé tout au long de mon entreprise.

TABLE DES MATIERES

I - INTRODUCTION	15
II - PRESENTATION DE L'ARC MIG-MAG	19
1. Introduction	19
2. Le soudage MIG-MAG – Définition.....	19
3. Principe général – le transfert de métal	21
3.1. Le régime de transfert par court-circuits (« <i>short arc</i> »).....	22
3.2. Le régime globulaire (« <i>globular mode</i> »).....	22
3.3. Le régime de pulvérisation axiale (« <i>spray arc</i> »)	23
3.4. L'effet de l'ajout de CO ₂	24
4. Les fils fourrés.....	24
4.1. Fabrication	24
4.2. Les différents types de fils fourrés	25
4.3. Les applications de chaque fil.....	25
5. Aspect pratique : les essais de maniabilité	26
III - ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	29
1. Introduction	29
2. Etude expérimentale de l'arc électrique	29
2.1. Etude de l'arc	29
2.2. Influence du gaz de protection.....	30
2.3. Etude de la zone fondue et du cordon de soudure.....	31
2.4. Etude de l'influence d'éléments particuliers.....	32
3. Modélisation.....	33
3.1. Etude du Détachement des gouttes	33
3.2. Etude de la zone fondue et du cordon de soudure.....	34
3.3. Etude de l'arc.....	35
3.4. Modèles pour l'arc de type TIG.....	36
4. Observation de l'arc	38
5. Etude spectroscopique.....	39
5.1. Diagnostic de l'arc par spectroscopie optique d'émission	40
5.2. Autres diagnostics spectroscopiques.....	41
6. Les fils fourrés.....	42
7. Synthèse	44
8. Les travaux réalisés aux laboratoire	46
IV - ETUDE THEORIQUE	49
1. Introduction	49
2. Modélisation.....	49
2.1. Etude de l'arc	49
i. Description électrodes.....	49
ii. Etude de l'anode.....	49
iii. Etude de la cathode.....	50
iv. Description de l'arc.....	52
2.2. Le détachement des gouttes	53
i. L'effet de la tension de surface.....	53
ii. Les forces électromagnétiques.....	55
3. Diagnostic du plasma par spectroscopie optique d'émission.....	58
3.1. Calcul de l'émission en fonction du rayon : l'inversion d'Abel	58
3.2. Profil d'une raie	60
i. L'élargissement naturel	60

ii. L'élargissement Doppler statistique	60
iii. L'élargissement collisionnel	61
iv. La fonction d'appareil	61
v. Profil résultant : profil de Voigt.....	61
3.3 L'équilibre thermodynamique local.....	62
3.4. Diagnostic du plasma.....	64
i. La méthode de Sola : détermination simultanée de la température et de la densité électronique	64
ii. Méthode des graphes de Boltzmann et Hypothèse d'ETL.....	66
iii. Détermination de la composition du plasma.....	68
4. Influence du dioxyde de carbone et des vapeurs de Fer sur les propriétés d'un plasma d'argon en ETL.....	69
5. Les diagrammes d'Ellingham.....	79
5.1. Oxydation en présence de traces d'oxygène	79
5.2. Réduction des oxydes par métallothermie	81
5.3. Oxydation en présence de CO ₂	81
5.4. Application des diagrammes d'Ellingham à notre problématique	83
i. Soudage sous argon pur	83
ii. Soudage sous mélange argon + CO ₂	83
iii. Conclusion	84
V - DISPOSITIF EXPERIMENTAL	85
1. Introduction : schéma général	85
2. L'installation de soudage	86
2.1. Le poste.....	86
2.2. L'alimentation en gaz	87
2.3. Le support de la pièce	87
2.4. La commande du soudage.....	88
2.5. Les électrodes utilisées	89
i. Les fils massifs	89
ii. Les fils fourrés.....	91
3. Les diagnostics électriques.....	92
3.1. La mesure du courant.....	92
3.2. La mesure de la tension.....	92
3.3. La synchronisation	93
4. L'imagerie rapide	93
4.1. Le montage optique.....	93
4.2. Les caméras utilisées.....	93
i. Caméra MVS-135.....	93
ii. Caméra Fascam-1024PCI.....	94
4.3. L'utilisation de filtre	95
5. La spectroscopie	95
5.1. Les spectromètres utilisés	95
i. Le spectromètre Sopra	95
ii. Le spectromètre Méchelle	97
5.2. Le montage optique.....	98
5.3. Remarque importante.....	100
VI - VISUALISATION DE L'ARC	101
1. Introduction	101
2. Etude des différents régimes de soudage	102
2.1. Procédure	102
2.2. Cas de la pulvérisation axiale.....	103
i. Etude des fils massifs	103
ii. Etude des fils fourrés	108
2.3. Cas du régime globulaire	109
i. Etude des fils massifs	109
ii. Etude des fils fourrés	110
2.3. Conclusion	111
i. Comparaison des forces en présence	111
ii. Surfaces d'interaction électrode-plasma.....	111
2.4. Cas particuliers	112

i.	Le transfert répulsif avec veine liquide.....	112
ii.	Le transfert par « pulvérisation multi-goutte »	114
3.	Etude de la transition pour les différents fils.....	115
3.1.	Procédure de mesure	115
3.2.	Critères de détermination du régime de transfert	116
i.	Présentation	116
ii.	Etude de la forme de l'arc.....	116
iii.	Mesure de la fréquence de détachement	117
iv.	Régime de transition	118
3.3.	Résultats	119
i.	Présentation	119
ii.	Etude des fils massifs	119
iii.	Etude de fils fourrés.....	121
4.	Corrélation entre les paramètres	124
4.1.	Etude de l'influence du courant sur chute de tension pour le fil 70 S.....	125
4.2.	Etude des autres fils massifs	129
i.	Fils ayant un taux faible de silicium	129
ii.	Fils contenant du titane	129
iii.	Conclusion.....	130
4.3.	Etude de fils fourrés	131
i.	Fils ayant un taux faible de silicium	131
ii.	Fils contenant des éléments susceptibles de former des oxydes conducteurs.....	132
iii.	Fils contenant des alcalins	133
iv.	Conclusion	135
5.	Conclusions	135
VII - ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE DE L'ANODE FUSIBLE.....		137
1.	Introduction	137
2.	Mesures	138
2.1.	Procédure des mesures.....	138
i.	Prélèvement des extrémités de l'anode.....	138
ii.	Polissage des échantillons	139
2.2.	Résultats expérimentaux	140
i.	Etude des fils massifs	140
ii.	Etude des fils fourrés	149
iii.	Commentaire concernant les compositions chimiques.....	161
2.2.	Conclusion générale de l'étude de la microstructure des fils	161
3.	Etude de la gangue	162
3.1.	Introduction.....	162
3.2.	Observation de la gangue.....	162
3.3.	Formation de la gangue.....	166
3.4.	Composition chimique	166
3.5.	Influence des caractéristiques électriques	167
3.6.	Influence des caractéristiques mécaniques.....	169
3.7.	Conclusion	170
VIII - SPECTROSCOPIE DU PLASMA		171
1.	Introduction	171
2.	Etude du spectre global de l'arc	171
2.1.	Le cas du titane	172
2.2.	Le cas du zirconium.....	173
2.3.	Cas du lanthane	174
2.4.	Cas du lithium.....	174
2.5.	Cas du sodium.....	175
2.6.	Cas du potassium	175
3.	Etude de la température et de la densité électronique	176
3.1.	Méthodologie.....	176
3.2.	Fonctionnement sous argon pur et Fil massif 70 S	178
i.	Répartition des température et densité électroniques dans la colonne	178
ii.	Proportion de fer dans le plasma	182
3.3.	Influence du taux de CO ₂ utilisé dans le gaz de protection.....	183

i. Répartition des température et densité électroniques dans la colonne.....	183
ii. Proportion de fer dans le plasma	188
3.4. Etude d'un autre gaz moléculaire : cas de l'azote N ₂	190
3.5. Influence de la composition du fil.....	191
i. Fils contenant du titane.....	191
ii. Fils contenant des alcalins : cas du Megafil	192
5. Conclusion.....	194
IX - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	197
X - ANNEXES	201
Annexe A : références spectroscopiques des raies utilisées pour le diagnostic	201
Annexe B : le poste de soudage SAFMIG 480 TRS	203
Annexe C : Caractéristiques des débitmètres massiques.....	205
Annexe D : Feuille de calcul pour le contrôle des débitmètres.....	207
Annexe E : Composition complète des différents fils.....	209
XI - BIBLIOGRAPHIE.....	211

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure II.1 : Schéma en coupe de l'extrémité d'une torche de soudage MIG-MAG.	20
Figure II.2 : Influence de la tension et de l'intensité du courant sur le régime de transfert de métal en soudage MIG dans l'argon (Documentation Air Liquide).	21
Figure II.3 : Transfert en régime de courts-circuits	22
Figure II.4 : Transfert en régime globulaire.....	23
Figure II.5 : Transfert par pulvérisation axiale	23
Figure II.6 : Fabrication d'un fil fourré	24
Figure II.7 : Comparaison d'un fil massif et d'un fil fourré, vue en coupe.	25
Figure IV.1 : Classification des matériaux selon leur émissivité thermoïonique	51
Figure IV.2 : Grandeurs utilisées pour le calcul de l'effet de la tension de surface.....	54
Figure IV.3 : Lignes de courant dans la goutte et dans le plasma adjacent, et forces électromagnétiques résultantes.....	55
Figure IV.4 : Spectre de l'arc centré à 5389 Å, après correction de l'inclinaison des raies.....	58
Figure IV.5 : Schéma de calcul de l'inversion d'Abel.....	59
Figure IV.6 : Elargissement Stark normalisé (FWHM) de la raie 5383.376 Å de FeI en fonction de la température	66
Figure IV.7 : Fonction de partition du fer atomique FeI [141, 142]	69
Figure IV.8 : Composition d'un plasma de mélange à l'ETL en fonction de la température	70
Figure IV.9 : Propriétés d'un plasma de mélange à l'ETL en fonction de la température.....	71
Figure IV.10 : Composition de plasmas de mélange Ar-Fe à l'ETL en fonction de T	72
Figure IV.11 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-Fe à l'ETL en fonction de T	73
Figure IV.12 : Conductivité électrique d'un plasma de mélange Ar-CO ₂ à l'ETL en fonction de T	73
Figure IV.13 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-CO ₂ + 1% Fe à l'ETL, en fonction du taux de CO ₂	74
Figure IV.14 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-CO ₂ -Fe à l'ETL [selon Murphy <i>et al.</i> – Cf texte]	75
Figure IV.15 : Diagramme d'Ellingham d'un couple MpOq/M.....	80
Figure IV.16 : Diagramme d'Ellingham : Utilisation	81
Figure IV.17 : Oxydation en présence de CO ₂	82
Figure IV.18 : Diagramme d'Ellingham.....	82
Figure V.1 : Dispositif expérimental	85
Figure V.2 : Réponse spectrale de la caméra Fastcam MVS-135.....	94
Figure V.3 : Dispersion du système optique équipé de la caméra intensifiée PI-MAX (512×512 pixels)	96
Figure V.4 : Sensibilité spectrale de la photocathode de la caméra intensifiée PI-MAX (512×512 pixels).....	97
Figure V.5 : Dispersion du spectromètre Méchelle 5000	98
Figure V.6 : Caractéristiques de l'amplificateur du détecteur ISTAR DH 734-18F-03	98
Figure V.7 : Schéma de la déviation des faisceaux lumineux par un prisme de Dove	99
Figure V.8 : Sélection de la hauteur de visée.....	100
Figure V.9 : Chemin optique du montage utilisé pour le diagnostic du plasma	100
Figure VI.1 : Observation de l'accrochage de l'arc avec la caméra MVS 135	102
Figure VI.2 : Morphologie de l'extrémité de l'électrode.....	104
Figure VI.3 : Répartition possible du métal fondu et du métal solide	104
Figure VI.4 : Surface de la goutte en contact avec le plasma	105
Figure VI.5 : Forme de l'arc en pulvérisation axiale	106
Figure VI.6 : schéma simplifié de l'arc et de l'électrode.....	107
Figure VI.7 : Forme de l'arc en pulvérisation axiale (a) caméra MVS 135 (filtre bleu); (b) caméra Fastcam (filtre bleu) ; (c) représentation schématique.....	108
Figure VI.8 : Forme de l'arc en régime globulaire (a) caméra Fastcam, éclairage par le laser ; (b) représentation schématique.....	109
Figure VI.9 : Forme de l'arc en régime globulaire (a) caméra MVS 135 (filtre bleu) ; (b) caméra Fastcam (filtre bleu) ; (c) représentation schématique.....	110
Figure VI.10 : Soudage sous argon + 30% CO ₂ , I = 300 A pour un fil fourré (G002), caméra Fastcam (filtre bleu). ...	111
Figure VI.11 : Transfert répulsif.....	113
Figure VI.12 : Détachement d'une goutte pour le fil 70 S sous argon + 15% CO ₂ , I = 330 A ; 333 μs entre 2 images.	114
Figure VI.13 : Pulvérisation multigoutte : Fil fourré Mégafil,	115
Figure VI.14 : Fréquence de détachement des gouttes en fonction du taux de CO ₂ pour le fil 70 S	118
Figure VI.15 : Transition entre le régime globulaire et la pulvérisation axiale en f° du taux de CO ₂ et du courant.....	119
Figure VI.16 : Courant de transition en fonction du gaz : fils massifs 'bas Silicium'	120
Figure VI.17 : Courant de transition en fonction du gaz : fils massifs 'Titane'	120

Figure VI.18 : Courant de transition en fonction du gaz : fils fourrés ‘bas Silicium’	121
Figure VI.19 : Courant de transition en fonction du gaz : fils fourrés ‘Titane’ et ‘Zirconium’	122
Figure VI.20 : Courant de transition en fonction du gaz : fils fourrés ‘bas silicium’ et ‘alcalins’	123
Figure VI.21 : Courant de transition en fonction du gaz : : fils fourrés ‘haut silicium’ et ‘alcalins’	123
Figure VI.22 : Evolution de l’arc en fonction du taux de CO ₂ pour différents courants – Fil 70 S	125
Figure VI.23 : Evolution de la tension d’arc en fonction du taux de CO ₂ pour différents courants	126
Figure VI.24 : Graphe Courant-CO ₂ donnant les valeurs de la transition vers le régime globulaire (■) et les points pour lesquels la tension repasse par sa valeur sous argon (○)	127
Figure VI.25 : Evolution de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc en fonction du taux de CO ₂	127
Figure VI.26 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes.....	129
Figure VI.27 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ de la tension (■,□) et de la hauteur (●,○) d’arc – Fils ‘Titane’	130
Figure VI.28 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré ‘bas silicium’ G002	131
Figure VI.29 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré ‘bas silicium’ G004	131
Figure VI.30 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré G003	132
Figure VI.31 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré G005	132
Figure VI.32 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré G006	133
Figure VI.33 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré ‘alcalin’ G007	133
Figure VI.34 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré ‘alcalin’ G008	134
Figure VI.35 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré ‘alcalin’ G009	134
Figure VI.36 : Evolution en fonction du taux de CO ₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d’arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré ‘Mégafil’	135
Figure VII.1 : représentation schématique des différentes parties de la goutte	137
Figure VII.2 : Répartition en deux phases de la gangue pour le fil massif 70 S	140
Figure VII.3 : Structure à la surface des fils à bas taux de silicium.....	142
Figure VII.4 : Surface des gouttes pour les fils AS 26 (a) et AS 35 (b).....	142
Figure VII.5 : Précipité d’oxydes dans la goutte	143
Figure VII.6 : Distribution des nodules à la surface de la goutte pour le fil massif S ₂ MoTi (0,1% Ti).....	143
Figure VII.7 : Surface de la goutte, fil massif AS 35, régime globulaire	145
Figure VII.8 : Extrémité du fil fourré (G002) en pulvérisation axiale.....	149
Figure VII.9 : Fil fourré G002, régime de pulvérisation axiale	150
Figure VII.10 : Soudage sous argon + 15% CO ₂ V _f = 15 m/mn, I = 410 A	151
Figure VII.11 : Fil fourré G002, pulvérisation axiale	151
Figure VII.12 : Soudage sous argon + 20% CO ₂ , V _f = 15 m/mn, I = 410 A	152
Figure VII.13 : Soudage sous fort taux de CO ₂ , V _f = 11.4 m/mn, I = 330 A	152
Figure VII.14 : Répartition des phases dans la gangue pour le fil fourré G005 en pulvérisation axiale.....	155
Figure VII.15 : Répartition des différentes phases dans la gangue pour le fil fourré G006 :	156
Figure VII.16 : Extension de la fusion du flux dans le fil Mégafil	159
Figure VII.17 : Fil AS 35, argon seul – I = 146 A	163
Figure VII.18 : Gouttelette de métal à la surface de la goutte, piégée dans la gangue	164
Figure VII.19 : Visualisation de la gangue, δt = 333 μs.	164
Figure VII.20 : Structure de la gangue en régime globulaire, fil massif AS 42 :	165
Figure VII.21 : Visualisation de la gangue en fil fourré	165
Figure VII.22 : Taux de CO ₂ à la transition en fonction du taux de Silicium dans le fil	168
Figure VIII.1 : Spectre global du fil de référence 70 S.....	172
Figure VIII.2 : Spectres des fils ‘Titane’ pour 4530 Å < λ < 4575 Å :	172
Figure VIII.3 : Spectres des fils ‘Zirconium’ pour 4675 Å < λ < 4690 Å :	173
Figure VIII.4 : Spectres des fils ‘Zirconium’ pour 4490 Å < λ < 4502 Å	173
Figure VIII.5 : Spectres des fils ‘Lanthane’ pour 4268 Å < λ < 4303 Å :	174
Figure VIII.6 : Spectres des fils ‘Lithium’ pour 8110 Å < λ < 8170 Å :	174
Figure VIII.7 : Spectres des fils ‘Sodium’ pour 8160 Å < λ < 8230 Å :	175
Figure VIII.8 : Spectres des fils ‘Potassium’ pour 6900 Å < λ < 6920 Å.....	175
Figure VIII.9 : Répartition de température dans le plasma, pour h = 3,5 mm, sous argon pur, avec I = 330 A	177

Figure VIII.10 : Répartition de température dans le plasma, pour $h = 4,0$ mm, sous argon pur, avec $I = 330$ A	177
Figure VIII.11 : Diagnostic de l'arc de 2 à 3,5 mm – argon, $I = 330$ A.....	178
Figure VIII.12 : Diagnostic de l'arc de 4 à 4,5 mm – argon, $I = 330$ A.....	179
Figure VIII.13 : Diagnostic de l'arc de 5 à 5,5 mm – argon, $I = 330$ A.....	179
Figure VIII.14 : Diagnostic de l'arc de 6 à 6,5 mm – argon, $I = 330$ A.....	180
Figure VIII.15 : Représentation schématique des isothermes : soudage sous argon, $I = 330$ A.	181
Figure VIII.16 : Rapport N_{Fe}/N_{Ar} dans l'arc – argon, $I = 330$ A.....	182
Figure VIII.17 : Diagnostic de l'arc pour $h = 3,0$ mm – $I = 330$ A.....	184
Figure VIII.18 : Diagnostic de l'arc pour $h = 3,5$ mm – $I = 330$ A.....	184
Figure VIII.19 : Diagnostic de l'arc pour $h = 4,0$ mm – $I = 330$ A.....	185
Figure VIII.20 : Diagnostic de l'arc pour $h = 4,5$ mm – $I = 330$ A.....	185
Figure VIII.21 : Diagnostic de l'arc pour $h = 5,0$ mm – $I = 330$ A.....	186
Figure VIII.22 : Diagnostic de l'arc pour $h = 5,5$ mm – $I = 330$ A.....	186
Figure VIII.23 : Diagnostic de l'arc pour $h = 6,0$ mm – $I = 330$ A.....	187
Figure VIII.24 : Diagnostic de l'arc pour $h = 6,5$ mm – $I = 330$ A.....	187
Figure VIII.25 : Répartition du rapport N_{Fe}/N_{Ar} – Mélange argon / CO_2 – $I = 330$ A.....	189
Figure VIII.26 : Diagnostic de l'arc pour $h = 4,5$ mm – $I = 330$ A.....	190
Figure VIII.27 : Répartition du rapport N_{Fe}/N_{Ar} – $I = 330$ A, $h = 4,5$ mm.	191
Figure VIII.28 : Diagnostic de l'arc pour $h = 4,5$ mm.....	192
Figure VIII.29 : Répartition du rapport N_{Fe}/N_{Ar} pour $h = 4,5$ mm, Fils 70 S, ■ ; AS 42, ● et G003, ▲.....	192
Figure VIII.30 : Diagnostic de l'arc pour $h = 3$ mm – $I = 330$ A – argon pur	193
Figure VIII.31 : Répartition du rapport N_{Fe}/N_{Ar} pour $h = 3$ mm	193
Figure VIII.32 : Diagnostic du plasma de soudage pour différents type de gaz de protection : argon pur, argon + 5% CO_2 et argon + 20% CO_2	194

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1 : Propriétés des cathodes thermoioniques ou à émission de champ	51
Tableau IV.2 : Données spectroscopiques des transitions utilisées pour le diagnostic	67
Tableau V.1 : Caractéristiques des gaz utilisés.....	87
Tableau V.2 : Analyse chimique des barres d'acier sur lesquelles est appliqué le cordon de soudure	88
Tableau V.3 : Composition du fil-anode 70 S.	90
Tableau V.4 : Concentrations des éléments étudiés pour les fils massifs (en pourcentage massique).....	90
Tableau V.5 : Concentrations de quelques éléments pour les fils fourrés (teneurs en pourcentage massique)	91
Tableau VI.1 : surface des sections en pulvérisation axiale (argon, I = 330 A), fil massif 70 S.....	107
Tableau VI.2 : Surface des différentes sections en pulvérisation axiale, fil fourré G002.....	108
Tableau VI.3 : Surface des différentes sections en régime globulaire, fil massif 70 S	110
Tableau VI.4 : Comparaison des différentes forces en présence	111
Tableau VI.5 : Surface des différentes sections pour les fils 70 S et G002	112
Tableau VI.6 : Evolution de la tension d'arc pour différents courants de soudage.....	126
Tableau VII.1 : épaisseur de la gangue e_g en fonction du gaz de protection à 330 A	140
Tableau VII.2 : épaisseur de la gangue e_g en fonction du courant sous argon + 15% CO ₂	140
Tableau VII.3 : Comparaison des phases observées pour les fils contenant du Zr (G005) et du Zr + La (G006)	156
Tableau VIII.1 : Comparaison de la zone lumineuse et de la concentration en fer.....	183
Tableau IX.1 : Caractéristiques du régime globulaire et de la pulvérisation axiale, à 330 A	197
Tableau IX.2 : Récapitulatif des différents éléments étudiés, par rapport à la composition du 70 S.....	198

I - INTRODUCTION

Le procédé de soudage sous argon existe depuis une soixantaine d'années et dès 1953 les premiers exemples d'utilisation d'un arc avec électrode fusible sous CO_2 ont été présentés par Lubawski et Nowosilov. Actuellement le procédé de soudage MIG-MAG (« Metal Inert Gas » - « Metal Active Gas ») est bien maîtrisé du point de vue technologique et son utilisation se répand de plus en plus dans des domaines tels que la construction métallique, la construction navale et l'automobile. Son principal atout est sa forte productivité. Cependant la complexité des phénomènes physiques mis en jeu dans ce procédé est telle qu'ils ne sont toujours pas connus de manière complète. L'amélioration des performances, que ce soit en terme de qualité ou de productivité, nécessite une étude approfondie de chaque paramètre.

Les recherches ont notamment été très rapidement axées sur l'étude de l'influence de la composition du gaz de protection sur la stabilité de l'arc. En effet, selon les conditions de travail, il est possible de définir plusieurs régimes de fonctionnement présentant de fortes différences en terme de stabilité de l'arc et du transfert de métal. Ce dernier aspect est particulièrement important du point de vue industriel puisque la finalité de l'opération de soudure est l'apport de métal pour la réunion des pièces à assembler.

Malgré la grande quantité de travaux sur le sujet, que ce soit sur le plan théorique ou expérimental, les principales hypothèses avancées pour expliquer les phénomènes observés nécessitent encore des confirmations pour permettre de caractériser complètement le sujet. Par ailleurs, la majorité des études effectuées ont été menées dans un but d'amélioration technologique et un plus faible nombre s'intéresse à l'aspect purement physique des phénomènes.

Les travaux présentés dans cette thèse font suite à ceux de S. Zielinska [1] qui avaient pour objectif l'étude des phénomènes physiques causant la transition entre un régime stable, dit de pulvérisation axiale, vers un régime instable, dit globulaire, lorsque du CO_2 était ajouté à l'argon dans le gaz de protection. Ses résultats ont montré que la présence d'une couche d'oxydes se formant à la surface de l'électrode consommable était associée au régime globulaire. Par ailleurs, pour améliorer la compréhension de l'arc, elle avait déterminé la distribution de température et de densité électronique à différentes hauteurs dans le plasma.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, financés par le CTAS, le centre de recherche d'Air Liquide Welding, ont visé à définir des paramètres permettant un fonctionnement sous le plus fort taux de CO_2 possible. Dans les conditions de référence étudiées dans les travaux de Sylwia Zielinska avec une anode fusible de type 70 S, le régime stable était observé, pour des courants modérés, avec un taux maximal de 15% de CO_2 dans l'argon. Cette valeur correspond à la limite généralement admise pour ce type de procédé. L'objectif fixé était de définir des paramètres permettant un soudage pour un taux de CO_2 supérieur à 50%.

Le principal paramètre étudié a été la composition du fil-électrode. Il a en effet été montré que les éléments minoritaires constituant l'acier se concentraient fortement dans la couche d'oxyde entourant son extrémité. L'hypothèse de travail était que l'ajout ou la suppression de certains éléments, même en très faible quantité, pouvait avoir une influence considérable sur les performances du procédé. Une partie des essais a été réalisée avec des fils massifs, mais pour effectuer une étude complète, il était nécessaire d'étudier des compositions ne pouvant être disponibles pour de tels fils. C'est ce qui a justifié l'emploi de fils fourrés, ces derniers représentant une variante largement utilisée du procédé MIG-MAG classique.

Idéalement, chaque élément aurait dû être étudié de manière indépendante. Dans la pratique, du fait même du mode de fabrication des fils utilisés, il est impossible d'obtenir deux fils strictement identiques et, a fortiori, de réaliser un fil de composition parfaitement contrôlée. En particulier l'oxygène est présent à un taux élevé du fait de l'état pulvérulent du fourrage. Par ailleurs les éléments ne sont pas introduits purs mais sous forme de composé (oxydes, carbonates,

fluorures) ce qui introduit une variabilité supplémentaire. L'interprétation des résultats doit donc tenir compte de ces différents aspects.

Deux solutions ont été étudiées pour obtenir le résultat recherché :

- La première consistait à modifier les caractéristiques électriques de la couche d'oxydes, ou gangue, pour modifier le passage du courant au niveau de l'électrode consommable.
- La seconde avait pour objectif d'étudier l'effet d'une modification des propriétés métallurgiques, notamment en terme de température de fusion de l'électrode.

Dans le premier cas, les éléments étudiés sont le titane, le zirconium et le lanthane ; dans le second, il s'agit du lithium, du potassium et du sodium. Ces éléments ont été ajoutés dans les différents fils. Le silicium, qui est présent dans le fil de référence, a par contre été étudié pour des taux inférieurs. Son effet intervient dans les deux approches étudiées.

Pour compléter les travaux entrepris par S. Zielinska, le diagnostic de température et de densité électronique a été prolongé de manière à obtenir une cartographie précise du plasma de soudage. Les résultats sont suffisamment détaillés pour envisager une utilisation du maillage des points calculés comme base de référence pour un modèle numérique. Le diagnostic complet du plasma a également été réalisé.

La thèse est composée de deux parties, l'une consacrée à la description du soudage et du cadre théorique et expérimental des travaux, et l'autre à la présentation des résultats expérimentaux.

La première partie comporte 4 chapitres. Après une présentation de l'arc électrique utilisé dans la technique de soudage MIG-MAG, une revue bibliographique présente les principaux résultats les plus récents concernant le soudage à l'arc, et plus particulièrement le procédé MIG-MAG. Une présentation du cadre théorique dans lequel s'inscrit l'étude est ensuite donnée, puis le dernier chapitre détaille le dispositif expérimental employé.

La seconde partie comporte trois chapitres dont le premier détaille les résultats obtenus par la visualisation de l'arc de soudage. La méthode employée est basée sur l'utilisation d'un filtre bleu permettant l'observation directe de l'arc, sans éclairage supplémentaire. Les images obtenues sont particulièrement utiles pour étudier l'extrémité fondue de l'électrode et les gouttes transférées simultanément avec l'arc de soudage. Les résultats sont détaillés pour l'ensemble des fils étudiés, ils permettent de comparer leurs performances concernant la possibilité d'obtenir facilement le régime de pulvérisation axiale. Les données sont également utilisées pour corréler les différents paramètres de l'arc de soudage.

Le deuxième chapitre de la seconde partie présente les résultats de l'observation microscopique de la structure de l'électrode consommable, prélevée après extinction de l'arc pour les différents essais. Cette étude est complémentaire de la première : elle permet de vérifier le comportement des différents éléments testés. La présentation des résultats expérimentaux est suivie d'une partie consacrée spécifiquement à la gangue. Elle présente l'interprétation croisée de l'observation par imagerie rapide et par microscopie électronique à balayage. En effet pour réaliser le bilan des observations, il est nécessaire de faire appel aux résultats présentés dans les deux chapitres précédents. Les différentes hypothèses et leur validation éventuelle en fonction des résultats observés sont détaillées en fin de chapitre.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation des résultats de l'étude spectroscopique. Le diagnostic de la température et de la densité électronique a été réalisé pour dix positions différentes dans l'arc de manière à obtenir le maillage le plus fin possible. Les résultats ont été obtenus pour deux compositions du gaz de protection : l'argon pur et en mélange avec 5% de CO₂. Trois autres types de gaz sont également présentés : l'argon avec 10% et 20% de CO₂, ainsi que l'argon avec 5% d'azote. Les mesures réalisées avec le fil de référence, sont comparées avec celles obtenues pour trois des autres fils utilisés au cours de l'étude. La composition du plasma est également déterminée pour tous ces cas.

Les travaux décrits dans ces chapitres ont été réalisés au LASEP (Laboratoire d'Analyse Spectroscopique et d'Energétique des Plasmas) à Bourges et au CTAS (Centre Technique des Applications du Soudage) à Saint-Ouen l'Aumône. Une grande partie des observations en microscopie électronique a cependant été réalisée au Centre de Recherche sur les Matériaux à Haute Température du CNRS à Orléans.

II - PRESENTATION DE L'ARC MIG-MAG

1. INTRODUCTION

Lorsqu'une quantité suffisante d'énergie est apportée à un gaz, initialement neutre, des particules chargées font leur apparition. Le milieu, s'il reste globalement neutre, contient alors des électrons et des ions chargés positivement ou négativement. Un tel milieu est un plasma : quand toute la matière est ionisée, on parle de plasma totalement ionisé. Cela ne se produit que pour de très fortes températures, dans les étoiles par exemple. Selon le type d'apport d'énergie et la nature du milieu ionisé, le plasma aura différentes propriétés. Dans le cas des plasmas artificiels, l'apport d'énergie dépend de l'application souhaitée.

Le phénomène d'ionisation est à la base de la formation d'un plasma. Il nécessite un apport extérieur d'énergie pour être créé et entretenu. En effet, la matière étant naturellement neutre, les particules chargées disparaissent rapidement par recombinaison dès la suppression de l'apport d'énergie. Cet apport peut prendre de nombreuses formes : réaction chimique exothermique, réaction nucléaire, action de photons ou d'électrons ou champs électrique. Industriellement, ce sont les trois derniers modes qui sont les plus utilisés. Dans le cas des lasers de soudage, le métal est fondu par l'apport d'énergie lumineuse, mais une partie est également vaporisée, puis ionisée. Comme ce phénomène a une grande importance pour le contrôle du processus, de nombreuses études ont été menées. Les plasmas de décharge, créés par une excitation électrique à haute fréquence, sont principalement utilisés dans l'industrie de la microélectronique. Les plasmas produits par passage de courant électrique ont une grande variété d'application. La pression, la nature du gaz plasmagène et l'intensité du courant qui le traverse en constituent les principaux paramètres de réglages.

Les plasmas de décharge, caractérisés par des tensions et des champs électriques élevés (≈ 10 kV/m) ainsi que par une forte chute de potentiel aux électrodes (≈ 100 V), sont obtenus généralement aux faibles courants et basses pressions ; à pression et courant plus élevés, le plasma évolue vers un régime d'arc caractérisé par un faible champ électrique dans la colonne (≈ 1 kV/m) et une faible chute de potentiel aux électrodes (≈ 10 V). C'est dans ce domaine que se situent les applications de soudage à l'arc, quel que soit le procédé (électrode, TIG, MIG-MAG...) : le plasma est à la pression atmosphérique et le courant atteint quelques dizaines à quelques centaines d'ampères. Les très fortes températures obtenues, plus de dix mille degrés, permettent de fondre et de souder facilement tous les métaux, rendant ces procédés particulièrement compétitifs.

Le plasma de soudage est créé au sein d'un gaz initialement isolant, entre deux électrodes reliées aux bornes positive (anode) et négative (cathode) d'un générateur. L'amorçage peut se faire par surtension, mais plus généralement par contact et éclatement d'un pont-fondu. Des particules ionisées ainsi générées permettent le passage du courant et la formation du plasma. Celui-ci est donc constitué des atomes ou des particules du gaz séparant les électrodes, mais également, pour les températures atteintes, des matériaux constitutifs des électrodes qui sont en partie vaporisées. Les vapeurs métalliques peuvent, dans certains cas, devenir l'un des principaux composants de certaines régions du plasma.

2. LE SOUDAGE MIG-MAG – DEFINITION

Le soudage est un procédé d'assemblage consistant à lier des pièces en effectuant une fusion locale de celles-ci. Cela permet d'assurer, après refroidissement, une continuité physique entre les deux pièces. Simplifiant les assemblages, cette technique offre les meilleures garanties de résistance mécanique, d'étanchéité et de continuités thermique, électrique et magnétique. Plusieurs matériaux peuvent être soudés, mais le principal domaine d'application du soudage est l'assemblage des métaux.

Pour améliorer la qualité du joint réalisé, en particulier lors du soudage de fortes épaisseurs, on diminue par usinage l'épaisseur des pièces au niveau du raccord. Le creux formé est alors comblé par ajout de métal, également fondu lors de la soudure. Ce métal d'apport est généralement de même nature que celui des pièces à souder : on parle alors de soudure autogène. La vitesse de soudage dépend notamment de la quantité de métal devant être apporté au raccord. Cette quantité, évaluée par le taux de dépôt de métal d'apport sur les pièces à souder, est un paramètre important pour évaluer la productivité du processus. En effet, plus la vitesse de dépôt est élevée et plus il est possible de souder vite, donc plus l'opération est économiquement rentable.

Le soudage à l'arc regroupe plusieurs techniques distinctes : le soudage à la baguette (ou à électrode enrobée), le soudage TIG (« Tungsten Inert Gas », dans lequel est utilisé une électrode en tungstène thorié avec un métal d'apport extérieur), le soudage MIG-MAG (respectivement « Metal Inert Gas » et « Metal Active Gas », dans lesquels l'électrode est fusible et fournit le métal d'apport), le soudage à l'arc submergé et le soudage plasma. Le premier est typiquement manuel, alors que les autres peuvent être mis en oeuvre par un opérateur ou automatisés sur un robot. Toutes ces techniques, sauf le soudage à l'arc submergé, ont en commun la nécessité de prévoir une protection gazeuse. En effet le métal fondu présente une très grande affinité pour les gaz, et la dissolution de gaz atmosphériques dans le cordon peut compromettre la qualité de la soudure réalisée. Si l'effet oxydant de l'oxygène semble évident, c'est surtout l'azote qui représente le principal danger. En effet son adsorption conduit à une altération considérable des qualités du métal. L'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur, est également un polluant important.

Dans le cas des soudages MIG et MAG, la protection de la zone fondue est assurée par un gaz délivré en continu et l'arc est établi entre une électrode fusible et les pièces à souder. Dans la littérature, l'acronyme GMAW, pour « Gas Metal Arc Welding », est utilisé pour désigner de façon plus générale les deux procédés. Le schéma de l'extrémité d'une torche MIG-MAG est donné sur la Figure II.1.

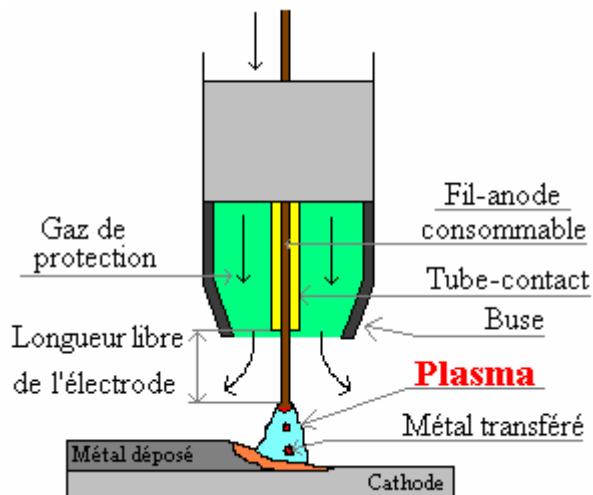


Figure II.1 : Schéma en coupe de l'extrémité d'une torche de soudage MIG-MAG.

Le soudage MIG (« Metal Inert Gas ») utilise un gaz inerte comme l'argon ou l'hélium comme gaz de protection. En soudage MAG (« Metal Active Gas »), un gaz chimiquement actif au niveau de la soudure est ajouté. Dans ce cas, le gaz le plus fréquemment employé est le dioxyde de carbone CO_2 , que ce soit pur ou mélangé dans différentes proportions avec un gaz inerte. On peut également utiliser d'autres gaz comme l'oxygène O_2 , l'hydrogène H_2 ou encore l'azote N_2 et/ou du monoxyde d'azote NO . Ils sont ajoutés en faible ou très faible quantité pour que l'effet recherché ne soit pas compensé par les inconvénients liés à leur présence. Dans la configuration la plus répandue, c'est le fil-électrode qui constitue l'anode et est relié à la borne positive du générateur par

l'intermédiaire d'un tube-contact situé à la base de la torche de soudage, alors que les pièces à souder sont reliées à la masse (cathode).

Les métaux soudables par ce procédé sont l'acier faiblement ou non allié pour le soudage MAG ; les alliages légers (à base d'aluminium...) et cuivreux, ainsi que les aciers inoxydables pour le soudage MIG. Le soudage MAG se caractérise par une plus forte productivité. Les applications sont nombreuses, dans la chaudronnerie, la construction navale, la construction automobile. Le soudage MIG-MAG permet en effet un taux élevé de dépôt de métal, ce qui est particulièrement utile pour le soudage des fortes épaisseurs.

Le fil-électrode, enroulé sur un tambour, est dévidé en continu au cours du soudage. Son diamètre est compris, selon les applications, entre 0,6 mm et 1,6 mm. Il est entraîné par des galets tournants dans une gaine débouchant dans la torche à une vitesse constante, de 1 à 20 m/mn. Pour le soudage MIG-MAG classique, le fil est en acier massif. Il est également possible d'employer des fils fourrés qui seront détaillés plus loin [Cf. paragraphe II.4 p24].

Différentes formes de courant sont utilisables pour le soudage. Outre le courant continu, qui représente une part importante des applications, il est possible d'utiliser un courant pulsé, pour optimiser le transfert du métal. La polarité peut également être alternée, mais les phases en polarité directe (fil-cathode et pièces-anode) ne doivent pas excéder une certaine limite. En effet, le soudage dans de telles conditions est moins stable. L'inversion de polarité est notamment utilisée dans le cas du soudage de l'aluminium, pour décaper la couche d'oxydes recouvrant la pièce.

3. PRINCIPE GENERAL – LE TRANSFERT DE METAL

Lors du soudage MIG-MAG, le transfert du métal fondu de l'électrode au cordon de soudure peut se faire de différentes manières. Il est ainsi possible de distinguer plusieurs modes de soudage, selon le gaz et l'intensité du courant employé. Selon le régime de fonctionnement, de nettes différences peuvent être observées, que ce soit au niveau de la qualité du cordon réalisé (présence ou absence de projections, régularité, pénétration de la zone soudée) ou au niveau du processus (émission de fumées). La répartition des régimes de fonctionnement en fonction de la tension et du courant, dans le cas du soudage MIG (argon) est donnée sur la Figure II.2.

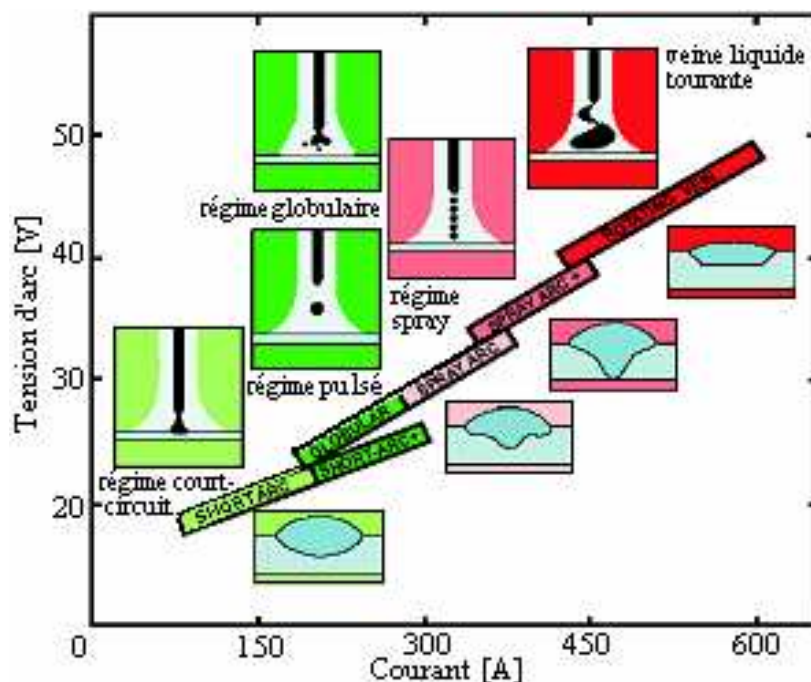


Figure II.2 : Influence de la tension et de l'intensité du courant sur le régime de transfert de métal en soudage MIG dans l'argon (Documentation Air Liquide).

Les trois régimes les plus courants sont le régime de transfert par court-circuits (ou « short arc »), le régime de transfert globulaire (ou « globular mode ») et le régime de pulvérisation axiale (ou « spray arc »). Chaque régime permet des applications différentes, mais le premier et le dernier sont les plus utilisés.

3.1. Le régime de transfert par court-circuits (« short arc »)

Ce régime [Cf. Figure II.3] est obtenu pour les plus faibles intensités, jusqu'à 150 A sous argon. Comme son nom l'indique, il consiste en une succession de court-circuits entre l'électrode et la pièce à souder. Lors d'un contact, l'extrémité de l'électrode chauffe par effet Joule jusqu'à sa fusion. Sous l'effet des forces électromagnétiques, le pont fondu formé se contracte jusqu'à la rupture. L'arc s'amorce dans le nuage de vapeurs métalliques formé, mais l'intensité du courant est trop faible pour faire fondre le fil à mesure de son avance. L'arc s'éteint donc et un nouveau court-circuit a lieu. Le métal fondu à l'extrémité de l'électrode forme une grosse goutte dont le diamètre peut atteindre deux à trois fois le diamètre du fil. Lors du contact, il est transféré par coalescence au bain de métal fondu au niveau de la pièce. La fréquence de détachement des gouttes est inférieure à 100 Hz et la tension d'arc est de l'ordre de 20 V.

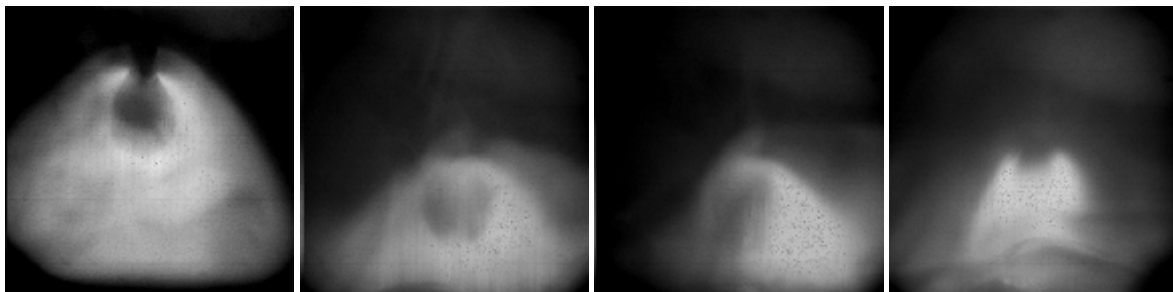


Figure II.3 : Transfert en régime de courts-circuits

La tension, lors des phases de fonctionnement de l'arc, est de 15 à 20 volts. Ce régime est caractérisé par de nombreuses projections de métal lors des éclatements du pont fondu. Cependant une optimisation de l'alimentation en courant permet d'en améliorer la stabilité. Il est utilisé pour le soudage de tôles de faible épaisseur (jusqu'à 1 ou 2 mm) en toutes positions.

3.2. Le régime globulaire (« globular mode »)

Pour des intensités plus importantes (jusqu'à 250 ampères environ sous argon) le régime de transfert est dit globulaire [Cf. Figure II.4]. Les gouttes formées à l'extrémité de l'électrode ont un diamètre un peu plus faible qu'en court-circuit, mais néanmoins plus élevé que celui du fil. La densité de courant est suffisante pour que l'effet Joule dans le fil et la chaleur provenant du plasma permettent au fil-électrode de fondre à mesure de son avance. Les gouttes se détachent lorsque leur taille dépasse une valeur critique et sont transférées dans l'arc vers la pièce en « vol libre ». Le cas le plus fréquent est la formation d'une grosse goutte à l'extrémité de l'électrode [Cf. Figure II.4_b] Pour un courant plus élevé, on observe également des transferts répulsifs, avec une veine de métal liquide orientée vers la cathode puis faisant un angle de 45° environ avant que les gouttes ne se détachent [Cf. Figure II.4_a]. Dans les deux cas, le point de chute peut être assez éloigné de l'axe du fil. Lorsque le métal tombe en dehors du bain de fusion, on parle de projection.

La zone couverte par les projections de métal est assez large, ce qui fait que ce mode de transfert est bien adapté au soudage en angle. Cependant, d'une manière générale c'est un régime qu'on souhaite éviter car il est instable. Par ailleurs la génération de fumées est importante. La fréquence de détachement des gouttes est plus élevée qu'en régime de court-circuits, environ 150 Hz. De même, la tension est plus élevée, environ 25 V.

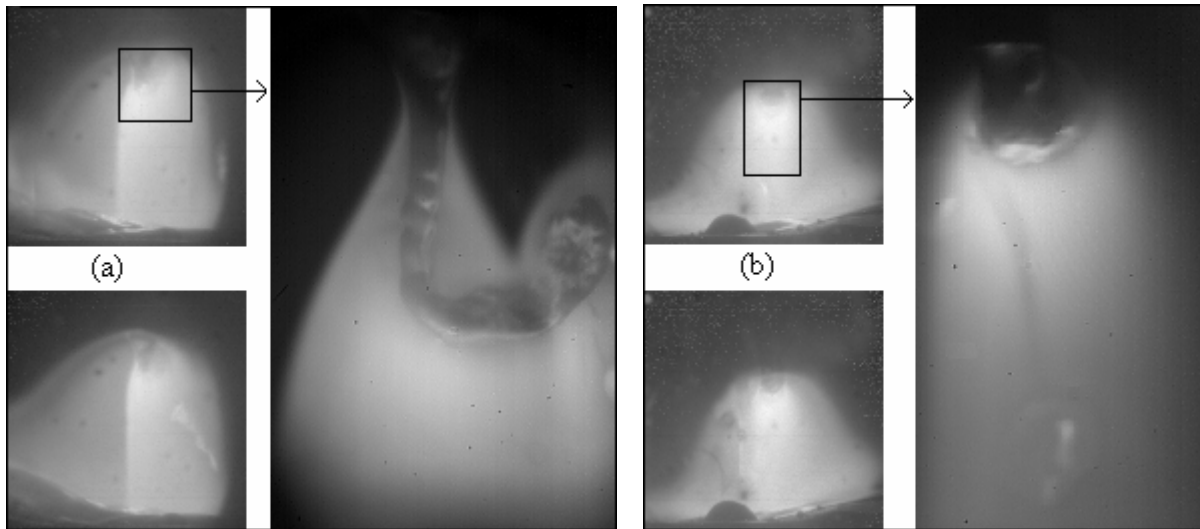


Figure II.4 : Transfert en régime globulaire
(a) : transfert répulsif ; (b) : grosses gouttes

3.3. Le régime de pulvérisation axiale (« *spray arc* »)

Pour les intensités les plus importantes, le transfert de métal se fait par pulvérisation axiale [Cf. Figure II.5]. L'extrémité de l'électrode fondue s'allonge en s'étirant sur une distance d'une à deux fois le diamètre de l'électrode, pour un diamètre réduit de moitié environ. L'extrémité de cette veine liquide se sépare en gouttelettes dont le diamètre est environ le tiers de celui du fil. Ces gouttelettes, projetées dans l'axe du fil, se détachent à fréquence élevée (300 à 400 Hz). Ce régime est caractérisé par une grande stabilité, avec très peu de projections, et un faible taux d'émission de fumées. La tension d'arc est de l'ordre de 30 V.

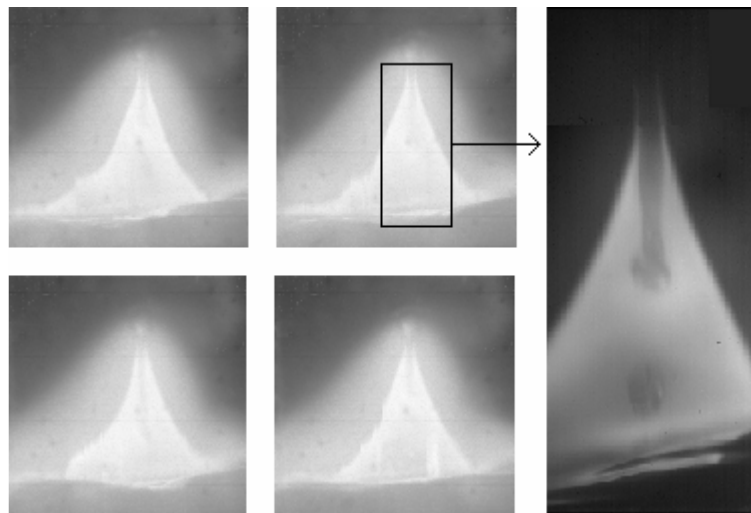


Figure II.5 : Transfert par pulvérisation axiale

Le régime de veine liquide tournante apparaît lorsque le courant augmente encore (au-delà de 450 A) ; la veine de métal s'étend alors jusqu'à la pièce et tourne sous l'effet des forces électromagnétiques.

Le régime de pulvérisation axiale est considéré comme le mode de fonctionnement le plus favorable. Son apparition, en fonction du courant, est définie par un seuil de transition. Il se traduit principalement par une diminution du diamètre des gouttes associée à une augmentation de leur vitesse de détachement. Cependant ce seuil est étalé sur une certaine plage, ce qui fait que de part et d'autre de la limite, le transfert de métal se fera selon un régime intermédiaire.

3.4. L'effet de l'ajout de CO₂

Sous argon, les trois régimes sont nettement définis.

Lorsque du CO₂ est ajouté dans le gaz de protection, la valeur du seuil de transition globulaire-pulvérisation axiale augmente, et il est nécessaire d'employer un courant plus important pour obtenir le régime de pulvérisation axiale. Compte tenu des courants disponibles sur un poste à souder classique (pas plus de 450 A), il existe donc un taux de CO₂ limite à partir duquel il est impossible d'obtenir le régime de pulvérisation axiale. Ainsi sous CO₂ pur il faudrait théoriquement un courant de 3000 ampères pour observe la transition. Même si un tel courant était disponible, cela n'aurait pas d'application car le surcoût de consommation électrique serait trop important.

Par ailleurs, à fort taux de CO₂, la forme des gouttes est beaucoup plus irrégulière qu'en argon pur, notamment dans le cas du régime globulaire ; la taille de la goutte devient alors beaucoup plus difficile à déterminer, et la classification précédente, basée sur la comparaison du diamètre de la goutte pendante et du fil-anode, devient difficilement applicable.

4. LES FILS FOURRES

Dans le cas général, le soudage MIG-MAG se fait avec un fil-électrode massif, en acier le plus souvent. Il est également possible d'utiliser des fils fourrés qui permettent d'élargir le domaine d'application de ce procédé. Le soudage avec fil fourré s'effectue avec le même matériel que pour les fils massifs et l'utilisation est, du point de vue de l'utilisateur, similaire. Il est seulement nécessaire d'ajuster certains réglages sur le poste, et de changer quelques pièces assurant le dévidage du fil.

4.1. Fabrication

Les fils fourrés sont constitués d'une gaine métallique entourant un cœur constitué de poudre d'éléments métalliques et/ou non métalliques, appelé flux. Plusieurs modes de fabrication existent [2], présentant chacun des spécificités d'emploi et de réalisation. Le procédé Chemetron, consiste à plier une bande métallique, ou feuillard, en forme de demi-tube par laminage à froid. Le demi-tube est rempli de poudre (flux) au moyen d'une trémie avant d'être refermé lors de son passage dans des galets de mise en forme. Deux techniques existent : la fermeture bord à bords et la fermeture du tube par recouvrement. Dans tous les cas, le diamètre est de 5 mm environ après fermeture. Le fil est ensuite amené au diamètre souhaité en passant dans des filières [Cf. Figure II.6].

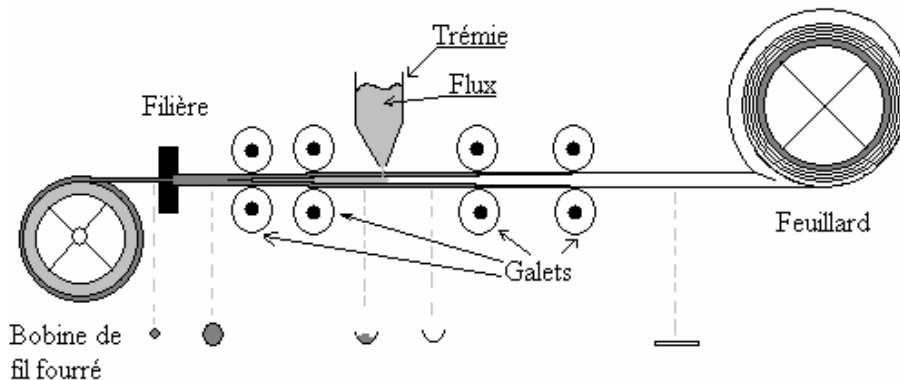


Figure II.6 : Fabrication d'un fil fourré

Dans le procédé Oerlikon, on utilise de tubes soudés remplis de flux par l'extrémité sur table vibrante. Le produit est ensuite tréfilé de la même manière que pour l'autre procédé, et peut être cuivré comme les fils massifs.

Les diamètres disponibles pour les fils fourrés sont semblables à ceux existants pour les fils pleins. La présentation du produit est identique : ce sont des bobines de fil prêtes à être montées sur le poste de soudage. Il existe des fils fourrés ayant une structure interne plus complexe, mais la configuration la plus courante est un flux entouré d'une gaine métallique simple. La vue en coupe transversale d'un fil massif et d'un fil fourré est donnée sur la Figure II.7. Contrairement aux fils massifs, les fils fourrés ne sont pas systématiquement recouverts de cuivre.

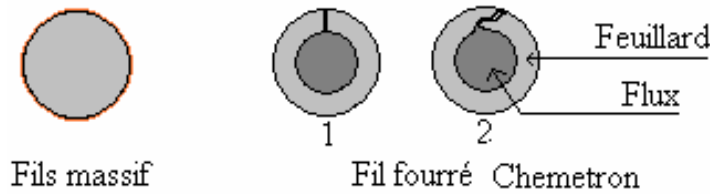


Figure II.7 : Comparaison d'un fil massif et d'un fil fourré, vue en coupe.
1 : fil fourré assemblé bord à bord ; 2 : fil fourré assemblé par recouvrement (overlap).

4.2. Les différents types de fils fourrés

Le choix de la composition du flux offre une très large gamme d'utilisation. Une première application concerne le soudage sans gaz. Dans ce cas la protection gazeuse est assurée par la vaporisation d'éléments présents dans le flux. Le principe est similaire à celui de l'électrode enrobée, à la différence que le flux est situé à l'intérieur de l'électrode.

Parmi les fils nécessitant une protection gazeuse supplémentaire, il existe trois grandes catégories : les fils métalliques, les fils rutilés et les fils basiques.

- Pour les fils métalliques (« metal core »), appelés aussi fils sans laitier, le flux est majoritairement constitué de fer et d'éléments présents dans les aciers comme le manganèse et le silicium. Le principal avantage de ces fils par rapport aux fils massifs est un taux de dépôt plus important.
- Pour les fils rutilés, le flux peut contenir par exemple du dioxyde de titane TiO_2 , de la silice SiO_2 , des feldspath. Ces éléments ont un seuil d'ionisation relativement bas, ce qui favorise la stabilité de l'arc. Le transfert se fait donc plus facilement en pulvérisation axiale. L'autre conséquence de la présence de ces composés est la formation d'un laitier à la surface du cordon de soudure, ce qui permet de souder en toute position.
- Pour les fils basiques, le flux peut contenir par exemple du fluorure de calcium CaF_2 , du carbonate de calcium $CaCO_3$, de la magnésie MgO . Ces éléments d'apport permettent d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques au niveau du cordon de soudure. Ils sont cependant plus difficilement ionisables et le transfert est moins régulier, de type globulaire.

D'une manière générale, le silicium et le titane sont utilisés comme désoxydants.

4.3. Les applications de chaque fil

D'une manière générale, l'avantage des fils fourrés est de permettre un plus grand taux de dépôt, donc une plus grande productivité. La possibilité de choisir les éléments présents dans le flux permet d'ajuster la composition du cordon de soudure en fonction du matériau à souder, et des propriétés mécaniques souhaitées. Les fils sans gaz sont principalement utilisés pour des applications en extérieur, sur un chantier par exemple. La stabilité de l'alimentation en gaz constitue en effet une limitation de l'usage du procédé MIG-MAG classique aux locaux protégés des conditions climatiques extérieures. Les fils fourrés sont utilisés sur tous les types d'acier, faiblement alliés ou aciers inoxydables.

5. ASPECT PRATIQUE : LES ESSAIS DE MANIABILITE

Pour caractériser un produit tel qu'un fil-électrode, plusieurs essais sont réalisés. Les caractéristiques mécaniques sont particulièrement importantes, car le cordon doit avoir au moins les mêmes performances que le matériau à assembler. Dans le cas contraire, la soudure constituerait un point fragile et diminuerait les qualités de l'ensemble. De même, la composition chimique du cordon doit être compatible avec celle du matériau. Dans certains cas, comme pour les soudures destinées aux centrales nucléaires, les tolérances sont particulièrement sévères.

Pour connaître la composition du métal déposé lors de la soudure, une étude hors dilution est réalisée. En effet lors du processus de soudage, le métal d'apport se mélange aux métaux de base des pièces à souder, fondues localement. La composition du cordon est donc intermédiaire entre celle du fil-électrode et celle des pièces soudées. Pour réaliser des essais hors dilution, des cordons successifs, ou passes, sont superposés jusqu'à ce que le dernier cordon soit suffisamment éloigné du métal de base. Sa composition est alors très proche de celle du fil-électrode, la différence provenant des éléments éventuellement vaporisés dans l'arc.

Pour déterminer les propriétés mécaniques du joint, des cordons de soudure successifs sont réalisés dans l'espace ménagé entre deux pièces constituant un moule. L'épaisseur est alors de quelques centimètres. Cette opération est généralement réalisée sur une plate forme robotisée. Des sections du cordon, d'un ou deux centimètres de large, sont alors coupées pour réaliser des éprouvettes servant aux essais mécaniques (traction, compression, rupture...) ou à l'étude de la microstructure.

Pour déterminer les performances en terme de soudure, des essais dits de maniabilité sont réalisés dans une configuration donnée (par exemple, la soudure en angle de deux plaques d'acier). Ils sont effectués manuellement par un soudeur qui détermine les qualités d'utilisation du produit. Les paramètres étudiés sont la stabilité de l'arc, la forme et l'aspect du cordon. Les critères de qualités résultent de l'observation de l'opérateur et ne sont généralement pas quantifiés de manière chiffrée. En effet, malgré la quantité d'études théoriques menées sur le soudage, la part empirique demeure importante dans le réglage des paramètres de fonctionnement. Pour associer une étude systématique du procédé aux critères de choix et de réglages employés, il est nécessaire de faire correspondre les observations réalisées au cours des essais de maniabilité avec les caractéristiques physico-chimiques mesurées au cours du processus ou sur le cordon de soudage.

- Les essais sont effectués avec une consigne de vitesse d'avance du fil, pour une tension définie. Le poste de soudage détermine de lui-même, après indication du gaz utilisé, le courant à appliquer pour obtenir un réglage optimum. Pour modifier la tension, le soudeur peut également modifier la distance entre la torche et le cordon.
- La stabilité de l'arc est évaluée à partir du bruit généré et de l'observation visuelle de l'arc. Il est alors possible de caractériser le régime de soudage (court-circuit, globulaire ou pulvérisation axiale), mais également d'évaluer la stabilité du transfert de métal dans l'arc. La quantité et la taille des projections sont également des paramètres importants.
Un arc stable produit un bruit fusant, alors qu'un arc irrégulier produit une fusion crépitante. Pour un comportement intermédiaire, seuls quelques claquements sont observés.
- L'observation à travers le masque (filtre coupe-bande éliminant notamment les UV) permet de distinguer une région centrale bien définie du reste de l'arc, dans le cas de la pulvérisation axiale, alors qu'en régime globulaire, l'arc est plus homogène. Par contre, en régime de court-circuits, sa faible longueur et sa courte durée d'allumage rendent difficiles la caractérisation de sa forme.
- L'évaluation de la largeur de la partie centrale de l'arc permet de définir si l'arc est bien dirigé ou non. Un arc bien dirigé, avec une partie centrale en forme de cône, assurera une largeur suffisante du cordon tout en conservant une densité d'énergie suffisante. Un arc plus diffus est associé à un transfert moins stable comme le régime globulaire. Cependant, si l'arc est trop

dirigé, le cordon réalisé est trop étroit et le mouillage des deux pièces sera limité.

- Les gouttes peuvent être visibles si elles sont suffisamment grosses, et que leur fréquence de détachement n'est pas trop importante. La rotation des gouttes peut être observée dans le cas du régime globulaire ; ce phénomène conduit généralement à des projections sur les côtés du cordon de soudure. En régime de pulvérisation axiale, le transfert de métal n'est par contre pas observable.
- Le cordon de soudure présente plusieurs caractéristiques. Le rayon de courbure de la section donne une information sur la qualité du mouillage : un cordon trop bombé est associé à un étalement insuffisant du métal et une qualité insuffisante. Pour une soudure acceptable le cordon doit être plat ou légèrement concave, ce qui assure une bonne jonction des pièces. Une fusion irrégulière, si l'arc est trop dirigé, peut conduire à des porosités ou soufflures sur le cordon. Enfin il est possible d'observer la présence de silicates, correspondant à la solidification des éléments légers, sous forme de perles vitreuses plus ou moins large à la surface du cordon.

III - ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

De nombreuses études ont été réalisées sur le procédé de soudage à l'arc, que ce soit expérimentalement ou à partir de modèles. L'objet de cette section n'est pas d'en faire une liste exhaustive mais de présenter les articles les plus récents et d'autres présentant un intérêt particulier. Elle complète la bibliographie réalisée précédemment par S.Zielinska [1]

Les travaux se concentrent souvent sur un des aspects du soudage, que ce soit le détachement des gouttes ou les caractéristiques du bain fondu par exemple.

- Les articles traitant majoritairement de résultats expérimentaux sont détaillés dans une première partie, ceux traitant essentiellement de la modélisation de l'arc dans une seconde partie. Dans chaque cas, ils sont classés selon l'aspect du soudage qui est le plus étudié.
- Une troisième partie détaille les articles pour lesquels l'analyse de l'arc est réalisée essentiellement par imagerie rapide, ou lorsqu'une technique particulière est développée.
- Une quatrième partie est consacrée aux articles traitant d'études spectroscopiques de l'arc.
- La cinquième partie concerne les articles relatifs aux fils fourrés.

Les articles sont présentés, pour chaque section, dans l'ordre chronologique.

2. ÉTUDE EXPERIMENTALE DE L'ARC ELECTRIQUE

Les articles traitant de l'arc électrique sont présentés dans la première partie, puis ceux concernant spécifiquement l'étude de l'influence du gaz de protection sont regroupés dans la seconde. La troisième partie traite des études réalisées dans le but de caractériser la zone fondue et le cordon de soudure réalisé. Enfin la dernière partie est dédiée aux articles traitant de l'effet d'éléments chimiques particuliers. La majorité des articles présentés traitent du soudage MIG-MAG, mais quelques articles traitant du soudage TIG mais présentant un intérêt particulier pour le MIG-MAG, sont également détaillés.

2.1. Etude de l'arc

G.Adam et T.A.Siewert [3] étudient le signal électrique de l'arc de soudage MIG-MAG pour caractériser les paramètres de fonctionnement des différents régimes de transfert. Ils évaluent la précision des différents outils (transformée de Fourier, rapport de l'amplitude des pics, histogrammes des amplitudes...) en fonction du régime.

R. Hajossy et I Morva [4] ont étudié la chute de potentiel à l'anode et à la cathode pour des électrodes fusibles dans l'air ou sous argon/CO₂. Ils montrent que le potentiel ne dépend pas du courant pour une valeur de 40 à 200 ampères. Par ailleurs ils mettent en évidence le rôle du flux de particules neutres sur l'électrode fondue ; l'émission des électrons par effet champs est associée à l'extinction de l'arc.

P.J.Modenesi, R.C. de Avelar *et al.* [5] étudient l'influence des propriétés mécaniques du fil-électrode (diamètre, résistance mécanique) sur le soudage MIG en court-circuit. Ils ont montré que les projections sont d'autant moins nombreuses que le diamètre du fil est important.

L.Grad, J.Grumb, I.Polajnar *et al.* [6] étudient le signal sonore généré en soudage MAG sous CO₂ et sous mélange argon + 10% CO₂ pour des courants de 110 à 130 A. Le son provenant des court-circuits et des ré-allumages de l'arc est prépondérant, ce qui est utilisé pour détecter les défauts de soudages.

S.C.Absi Alfaro, G.C.Carvalho et S.A. de Melo Junior [7] déterminent la distance entre le tube-contact et la pièce en soudage MIG-MAG par court-circuits, à partir de la mesure de la

résistance électrique lors du contact. Les essais sont réalisés pour un fil de 0,8 mm de diamètre sous mélange argon + 25% de CO₂ pour un courant de 100 à 200 A.

M.Tanaka, M.Ushio, M.Ikeuchi *et al.* [8] mesurent la fonction de travail d'électrodes de type TIG pour des arcs de 100 et 200 A. L'effet photoélectrique généré par des impulsions laser (YAG et à colorant) est observé sur le signal de tension pour caractériser la fonction de travail lors du fonctionnement de l'arc. La température de l'électrode est mesurée par pyrométrie. Les résultats montrent que la fonction de travail, pour les électrodes étudiées (tungstène pur, tungstène-2% ThO₂, tungstène-2% La₂O₃), est plus faible pour un courant de 200 ampères que pour un courant de 100 ampères.

G.Yang, P.Cronin, J.V.Heberlein *et al.* [9] étudient la zone anodique d'un arc de dépôt par pulvérisation pour une torche à plasma avec un flux de gaz latéral, sous des courants de 80 à 100 A. Le plasma est observé avec une caméra rapide à 4500 images par secondes ; le diagnostic se fait par sondes de Langmuir, placées dans l'anode. L'accrochage de l'arc est étudié avec un système à anode multiple.

E.J.Soderstrom [10] étudie l'influence de la réduction du diamètre des électrodes pour abaisser le courant de transition entre le régime globulaire et le régime de pulvérisation axiale en soudage MIG-MAG. Le transfert répulsif est observé dans tous les cas pour un taux de CO₂ supérieur à 30%. Les résultats montrent que le diamètre des gouttes diminue en fonction de celui de l'électrode jusqu'à une valeur minimale qui ne peut être dépassée même si le diamètre de l'électrode est encore réduit.

F.Molleda, J.Mora, J.R.Molleda *et al.* [11] étudient les projections formées en soudage à électrode enrobée. Les analyses au MEB montrent des inclusions de laitier dans les gouttes qui le traversent; La présence de ce laitier autour des gouttes empêche leur oxydation et maintient leur température, favorisant ainsi leur adhésion à la pièce.

P.M.G.P.Moreira, O.Fraza, S.M.O.Tavares *et al.* [12] étudient différents dispositifs de thermocouples pour mesurer la température de la pièce (en aluminium) en soudage MIG sous argon, à 170 A. Les résultats sont comparés à des mesures par thermographie et montrent un bon accord des deux méthodes.

2.2. Influence du gaz de protection

Anthony T.Zimmer, P.A.Baron et P.Biswas [13] étudient l'influence du gaz de protection et du régime de transfert sur la quantité de fumées produite. En régime de pulvérisation axiale, la faible taille des gouttes cause une évaporation plus importante et donc plus de fumées. Plus le gaz de protection est oxydant (CO₂) et plus les fumées sont importantes.

J.Tusek et M.Suban étudient l'influence des gaz sur le procédé de soudage. Dans un premier article [14], ils analysent l'effet de l'ajout d'hydrogène en TIG et en MIG, pour des courants de 150 à 250 A, montrant que la résistance de l'arc est augmentée et que les qualités mécaniques du cordon sont améliorées. La fusion du fil en MIG est plus rapide. Les essais ont été réalisés pour un taux maximal de 20% H₂ en TIG.

Dans un second article [15] ils présentent une méthode de mesure de la stabilité de l'arc MIG-MAG basée sur l'étude des signaux électriques. Trois gaz sont étudiés : le CO₂, un mélange argon + 18% CO₂, et un mélange TIME à 4 composants (argon + 26,5% He + 8% CO₂ + 0,5% O₂). Les courbes de la tension en fonction du courant sont tracées pour chaque gaz. Les résultats montrent que le CO₂ permet le fonctionnement le plus stable en régime de court-circuits, tandis que c'est le mélange TIME qui permet la plus grande stabilité en régime de pulvérisation axiale. Les auteurs présentent également les résultats obtenus avec le mélange TIME pour les fils fourrés dans un troisième article [16] dont les résultats sont présentés ultérieurement, dans la section consacrée à ce type de fils.

D.Iordachescu, L.Quintino, R.Miranda *et al.* [17] étudient l'effet de l'ajout d'oxygène, d'azote, d'hélium et d'hydrogène à l'argon en soudage MIG d'acier recouvert de zinc. Les essais sont réalisés en courant pulsé (régime de court-circuits). La stabilité de l'arc est évaluée, ainsi que la qualité du cordon réalisé. Leurs résultats montrent que l'ajout d'un faible pourcentage d'oxygène ou d'hélium dans l'argon représente le meilleur compromis en terme d'apport de chaleur et de stabilité de l'arc.

I.Pires, L.Quintino et R.M.Miranda [18] étudient des régimes de transfert et de la formation de fumées en fonction du gaz de protection. Des essais sont réalisés avec un fil 70 S de 1,2 mm de diamètre pour différents gaz (2,8, 18% de CO₂, 5 et 8% de O₂, mélanges Ar-O₂-CO₂) pour des courants de 100 à 375 A. La caractérisation du régime de transfert se fait par le traitement des signaux électriques, l'enregistrement du signal sonore généré et le rayonnement lumineux émis par l'arc. Le régime de fonctionnement stable est recherché pour une vitesse-fil et un courant constant, en faisant varier la tension d'arc. L'effet négatif du CO₂ sur la stabilité de l'arc est attribué à la conductivité thermique plus élevée du CO₂, augmentant les pertes. Elle entraîne également une répartition de température plus homogène dans l'arc et, sous argon pur ou en présence d'un faible taux de CO₂, une partie centrale plus chaude. La haute conductivité thermique du CO₂ empêche l'arc d'entourer la goutte et conduit à un accrochage de dimensions réduites à sa base, d'où des forces électromagnétiques répulsives. Le transfert répulsif est causé par l'élévation de température entraînant une vaporisation plus importante du métal. Sous oxygène, la température augmente également et une couche d'oxyde se forme sur la cathode. La présence de gaz oxydant augmente la longueur d'arc et le taux de formation de fumées.

M.Tanaka, S.Tashiro, M.Ushio *et al.* [19] étudient un nouveau dispositif de torche TIG utilisant du CO₂ pour provoquer la constriction l'arc. Elle est due à la plus grande chaleur spécifique du CO₂. Il en résulte un meilleur effet thermique et une pénétration améliorée. La durée de vie de l'électrode est également étudiée.

2.3. Etude de la zone fondue et du cordon de soudure

L.Shanping, F.Hidetoshi et N.Kiyoshi [20 et 21] ont étudié l'influence d'un ajout de CO₂ dans un arc TIG sur la forme du bain fondu avec une électrode en tungstène thorié placée à 3 mm de la pièce, en acier inoxydable. L'effet Marangoni de convection est évalué pour différents gaz de protection (mélange de 0 à 10% de CO₂ dans l'argon pour le premier article, 0,092 à 2% pour le second), pour un courant de 160 A. La forme et la composition du cordon de soudure sont mesurées en fonction du taux de CO₂. Une couche d'oxyde dont l'épaisseur augmente avec le taux de CO₂, se forme à la surface du métal transféré pour un taux supérieur à 0,6%. Elle empêche le contact avec le plasma et l'absorption d'oxygène supplémentaire et supprime la convection. Avec peu d'éléments actifs, le coefficient de dépendance à la température de la tension de surface est négatif et l'effet Marangoni de convection est dirigé vers l'extérieur. Au-delà d'une valeur seuil, le signe change et l'effet est inversé. Ainsi, pour un taux d'oxygène supérieur à 100 ppm dans le métal fondu, le mode de convection passe d'une orientation vers l'extérieur à une orientation vers l'intérieur.

R.Kaçar et K.Kökemli [22] étudient un dispositif de soudage MIG-MAG dans une enceinte étanche, entièrement remplie d'argon. Le cordon est analysé au microscope électronique et des essais mécaniques sont réalisés. Les résultats montrent une meilleure résistance du matériau et l'absence de porosités.

H.Ates [23] présente l'étude de l'influence du gaz de protection en soudage MIG-MAG sur les propriétés mécaniques du cordon pour élaborer un modèle à base de réseau de neurones. Les essais sont réalisés pour un courant de 180 A et avec différents gaz (mélanges argon-O₂ et argon-CO₂, mélanges ternaires). Les résultats montrent un bon accord du modèle avec la réalité.

Y.H.Chang [24] étudie, en soudages MIG et TIG, un procédé dans lequel le gaz de protection change alternativement entre hélium et argon. Il compare l'effet obtenu sur la qualité du joint réalisé, à celui d'un mélange argon + 67% He. Les résultats montrent une amélioration de la

pénétration, une diminution de la porosité et des fissures, et une amélioration de la résistance du cordon.

P.Teulet, L.Girard, M.Razafinimanana, A.Gleizes *et al.* [25] étudient par pyrométrie le transfert de chaleur au niveau de la pièce dans le cas d'une torche de coupage plasma. Les pertes (radiation, convection...) et les gains (oxydation du fer) en énergie sont identifiés. L'accrochage de l'arc est observé en imagerie rapide (250 images par seconde). Un autre article des mêmes auteurs [26], traitant de l'étude spectroscopique, est détaillé dans la section correspondante.

M.A.Wahab, M.S.Alam, M.J.Painter *et al.* [27] ont réalisé des essais pour étudier les contraintes résultantes dans le cordon à la suite du procédé de soudure MIG-MAG. Le courant varie de 228 à 334 A, pour un fil de 1,2 mm de diamètre, sous mélange argon + 1,5% O₂. L'étude numérique est menée avec un modèle par éléments finis, pour calculer le champ thermique dans la pièce. La vitesse de soudure a peu d'influence ; par contre un plus grand apport de chaleur augmente les contraintes.

G.Campana, A.Fortunato, A.Ascari *et al.* [28] analysent les paramètres agissant sur la qualité du cordon réalisé en soudage MIG assisté par laser. Les régimes de court-circuits et de pulvérisation axiale pulsée sont étudiés pour un gaz de protection composé de 40% He + 57% Ar + 3% O₂. La puissance laser est de 3 kW. Dans un second article [29], ils étudient des mélanges ternaires (He-Ar-O₂). Un pourcentage optimal d'hélium est défini, et le débit de gaz le plus efficace est déterminé.

2.4. Etude de l'influence d'éléments particuliers

L'influence du lanthane sur la fonction de travail des électrodes [8] a déjà été présentée ci-dessus. Mais M.Tanaka *et al.* ne considèrent par contre pas l'effet de ces éléments sur des caractéristiques telles que la température de fusion de l'électrode.

Dés 1955, A.Lesnewich [30] étudie les performances d'électrodes consommables recouvertes d'une fine couche d'éléments alcalins. Il montre que la fonction de travail étant diminuée, l'ionisation est facilitée et l'arc est plus stable. Dans un article publié en 1961, E.Cushman [31] étudie l'influence d'alcalins (Na, K, Rb et Cs) ajoutés à la surface de l'électrode sur la stabilité du transfert sous CO₂, en polarité directe (fil-cathode) : les résultats sont obtenus dans une configuration différente de celle étudiée ici. Les éléments ajoutés augmentent l'émissivité du fil et diminuent sa vitesse de fusion (température moins élevée car plus de pertes). Les désoxydants, comme le silicium, limitent l'effet des alcalins : le courant de transition est d'autant plus élevé que la quantité de silicium est importante. Les autres désoxydants, comme le titane et le zirconium, augmentent également le courant de transition. Le recouvrement de l'électrode empêche le courant de se concentrer à la pointe de l'électrode (ce qui favoriserait l'établissement du régime globulaire) et permet donc le régime de pulvérisation axiale. En effet, comme il se vaporise avant la fin de la veine de métal liquide, la pointe n'est pas activée et sa fonction de travail est plus élevée ; le courant passe donc préférentiellement sur les côtés de l'électrode. L'utilisation de baryum et de strontium permet de diminuer la vitesse de fusion du fil. Un taux de désoxydant (silicium) élevé permet d'obtenir la pulvérisation axiale avec un arc plus long (3 mm) et un courant peu élevé si le recouvrement d'alcalin est suffisant. Les fils de faible diamètre enduits correctement, permettent d'obtenir le régime de pulvérisation axiale sans trop réduire la longueur libre de l'électrode. Sous CO₂ les alcalins peuvent former des oxydes présentant les mêmes propriétés concernant la fonction de travail.

Plus récemment, E.Bauné, C.Bonnet et S.Liu [32] ont étudié l'influence d'éléments alcalins (Li, K, Na, Mg) dans des fils fourrés de type 'basiques' sur la stabilité de l'arc et sur la quantité de projections. Ils ont comparé leurs résultats à ceux obtenus avec des électrodes 'rutiles'. Les éléments sont introduits sous forme d'oxydes, et les essais sont réalisés sous CO₂ pour différents courants. Le détachement des gouttes est mesuré à partir de l'analyse des signaux électriques, tandis qu'une étude statistique des projections est réalisée. Un effet bénéfique des alcalins est observé et attribué à une ionisation facilitée et à l'abaissement de la fonction de travail de l'électrode.

Par ailleurs, l'influence des lanthanides sur le transfert de métal pour des fils massifs et fourrés, est présentée par M.S.P.Murthy et C.R.Loper [33]. Les observations sont réalisées par imagerie rapide ($4000 \text{ images.s}^{-1}$) avec un éclairage derrière l'arc (lampes halogènes). L'influence de la vitesse-fil, de la polarité et de la longueur d'arc est étudiée. Les résultats montrent que l'abaissement de la fonction de travail de l'électrode permet une émission électronique plus forte, d'où une perte énergétique plus importante et une réduction de la vitesse de fusion du fil.

3. MODELISATION

Il existe de très nombreux travaux traitant spécifiquement de la modélisation de l'arc électrique. Comme pour les articles traitant de résultats expérimentaux, on peut les classer en plusieurs catégories : certains concernent plus particulièrement l'étude du détachement des gouttes ; d'autres traitent de l'étude de la zone fondue de la pièce ou du cordon, généralement en soudage MIG-MAG, parfois en soudage TIG ; les derniers concernent l'étude de l'arc lui-même, notamment l'effet du CO_2 . Les articles concernant spécifiquement le soudage TIG sont traités dans une dernière partie : si ce type d'arc est différent de celui étudié dans le cadre de ce travail, les résultats de la modélisation donnent des éléments de comparaison utile pour l'étude du soudage MIG-MAG.

3.1. Etude du Détachement des gouttes

J.H.Waszink et G.J.P.Van den Heuvel [34] étudient le transfert thermique dans l'électrode en soudage MIG-MAG, dans les cas du régime globulaire et de la pulvérisation axiale. Ils montrent que le chauffage ohmique n'est pas suffisant pour rendre compte du taux de fusion mesuré du fil-anode. L'apport complémentaire provient de la conduction thermique depuis la surface de l'anode chauffée par le plasma. Le détachement des gouttes est régi par l'équilibre entre les forces électromagnétiques et l'avance du fil d'une part (forces descendantes) et la tension de surface (force ascendante) d'autre part.

L.A.Jones, T.W.Eagar et J.H.Hang [35] modélisent le détachement des gouttes sous l'effet des forces magnétiques. Leur intensité augmente fortement lors du détachement. Les forces sont calculées à partir de la géométrie de la goutte et appliquées au centre de gravité. La nouvelle position et la nouvelle forme de la goutte sont calculées à chaque étape de calcul. Trois cas sont étudiés: la croissance d'une goutte avec et sans étranglement, et la traversée du plasma par une goutte détachée. L'effet du plasma sur les gouttes en vol est ensuite étudié plus en détail. Les gouttes sont modélisées par des ellipsoïdes axisymétriques. Les simulations ont été faites en courant constant et pulsé. En courant constant, la valeur de la tension de surface doit être réduite pour que le modèle soit correct. Pour justifier ceci, les auteurs mettent en avant l'effet d'une force radiale, qui n'était pas prise en compte dans le modèle : des mouvements de matière dans la goutte se développent et annulent la composante rotationnelle de la force magnétique, qui est donc moins efficace pour détacher les gouttes.

Les mêmes auteurs présentent dans un second article [36] la modélisation des forces électromagnétiques dans la goutte pour des courants de 220 et 240 A, pour un gaz de protection composé d'un mélange argon + 2% O_2 . Les gouttes traversant l'arc sont supposées ne pas être parcourues par un courant. En effet, d'après les auteurs, même si la conductivité électrique de la goutte est plus élevée que celle du plasma, la température du métal reste trop faible pour assurer l'émission thermoionique nécessaire au passage du courant. Des observations par imagerie rapide ($4000 \text{ images.s}^{-1}$, rétro-éclairage laser) sont réalisées. La force magnétique est déterminée par la forme de la goutte et la densité de courant émise à la surface.

J.Hu et H.L.Tsai [37] étudient l'influence de la forme du courant sur le détachement des gouttes et le bain de métal fondu. Leur modèle inclut les électrodes, le plasma, la formation, le détachement et le parcours des gouttes de métal. Pour la modélisation du plasma, la gaine anodique est calculée à part, en tant que plasma non-collisionnel. La distribution des forces

électromagnétiques et la température dans la goutte sont calculées au cours du temps, jusqu'au détachement et après celui-ci.

Ils développent ensuite en deux parties [38 et 39] un modèle complet de l'arc, en considérant une symétrie axiale pour un domaine de calcul cylindrique. Le pas de la grille de calcul est variable, plus fin au niveau des électrodes. Les conditions de soudage étudiées sont un courant de 220 A sous argon pour une électrode de 1,6 mm de diamètre. La température, le champ électrique, les lignes de courant, les forces électromagnétiques et la pression de l'arc sont calculés pour un temps de soudage de 1 s. Le modèle prend en compte le détachement, la chute et l'impact des gouttes sur le bain fondu. La température maximale calculée est de 19300 K sous la goutte, sur l'axe.

Dans la deuxième partie, [39], les auteurs étudient la formation de la goutte et son transfert dans l'arc, ainsi que les distributions de température, de potentiel électrique, de vitesse, de courant et des forces électromagnétiques. Le courant est déterminé à partir du couplage entre le plasma et le métal. La température maximale calculée à sa surface est de 2936 K. La solidification de la goutte et de la pièce est modélisée après l'extinction de l'arc.

P.J.Modenesi et R.I.Reis [40] modélisent la fusion de l'électrode en soudage MIG-MAG en prenant en compte l'évolution de température dans le fil et la vaporisation du métal. Les résultats du calcul (effectué sous Matlab) sont comparés avec des mesures par imagerie rapide (2000 images.s⁻¹, rétro-éclairage laser) pour des essais sous argon, 4% CO₂ et 2% O₂ pour des courants de 140 à 340 ampères. Les auteurs montrent que le taux de fusion du fil varie de manière parabolique par rapport au courant, et que pour les valeurs les plus élevées, le chauffage par effet Joule est plus important que l'apport d'énergie par l'arc. Une transition de vitesse de fusion du fil est mise en évidence et correspond au passage de la pulvérisation axiale avec veine liquide vers un régime de pulvérisation avec de grosses gouttes. Dans le cas de la veine de métal, la surface du métal liquide en contact avec le plasma est plus importante et la chaleur apportée par l'arc à l'extrémité diffuse moins facilement vers le haut de la goutte (chemin plus long et étroit à parcourir). La veine de métal reçoit plus d'énergie et la perd plus difficilement vers le haut de l'électrode, d'où une vaporisation plus importante. Il en résulte une fusion moins rapide du fil, qui se traduit par un palier sur la courbe de la vitesse de fusion en fonction du courant.

3.2. Etude de la zone fondue et du cordon de soudure

I.S.Kim et A.Basu [41] réalisent une simulation avec un modèle 2D non-stationnaire axisymétrique pour déterminer la géométrie du bain de fusion et les profils de vitesse et de température. Le modèle prend également en compte l'impact des gouttes de métal fondu. Il est calculé avec le code PHOENICS (basé sur l'algorithme SAMPLE). Le calcul se fait par la résolution des équations de Navier-Stokes et de conservation de l'énergie. Les résultats montrent que les forces magnétiques, l'impact des gouttes et la tension de surface sont les paramètres prépondérants.

Y.Wang et H.L.Tsai [42] modélisent, en symétrie axiale, l'impact des gouttes sur le bain de métal fondu depuis son détachement de l'extrémité du fil-électrode. La technique du 'volume de fluide' (VOF) est utilisée pour calculer la surface libre. Les différentes forces modélisées agissant sur le bain sont les forces électromagnétiques, la force de traînée du plasma et la tension de surface. Le courant d'arc est fixé à 155 A et la température initiale de la goutte est de 2400 K.

Les auteurs développent ensuite [43] un modèle mathématique pour étudier la dynamique du bain de métal fondu, sous l'effet de l'impact des gouttes et de la convection due à la tension de surface (effet Marangoni). Le profil de température, la forme du bain, le mouvement du fluide et la concentration en soufre sont calculés en utilisant un modèle transitoire 2D également basé sur la méthode du 'volume de fluide'. La force de traînée du plasma est également prise en compte. La tension de surface est calculée en fonction de la température, pour différentes concentrations en soufre : elle apparaît comme la principale force agissant sur les mouvements de matière. La

distribution des vitesses dans toute la zone fondue est calculée en fonction du temps, en tenant compte de l'impact des gouttes.

A.Kumar et T.DebRoy présentent dans un premier article [44] le calcul de la force électromagnétique dans le bain de métal fondu. La densité de courant dans le plasma est évaluée, et le modèle permet de calculer toutes les composantes de la force magnétique. Les mêmes auteurs présentent dans un second article [45] la modélisation des transferts de matière et de chaleur dans le bain fondu. Des courants de 312 à 376 A sont étudiés. L'influence de l'efficacité de l'apport d'énergie de l'arc est calculée sur plusieurs itérations.

S.Mishra et T.DebRoy [46] étudient le transfert thermique en soudage TIG pour différentes configurations, en utilisant un algorithme 'génétique' (« genetic algorithm ») dans le but de prédire la forme de la zone fondue pour différents paramètres de courant et de tension.

K.Choi, W.Kim, K.Kim *et al.* [47] étudient un modèle 3D par éléments finis du processus de soudage. Les résultats sont appliqués au calcul des contraintes résiduelles pour une séquence de soudage d'un tube.

X.Huang et S.Chen [48] présentent une modélisation du bain fondu par un programme basé sur une logique si-alors. Les mesures sont effectuées en soudage MIG pulsé alternatif à 1 Hz sous 100 A.

X.Guoxiang et W.Chuansong [49] modélisent la géométrie du bain de métal fondu avec un modèle 3D résolu par la méthode des éléments finis, le transfert étant supposé globulaire. Des essais sous argon + 10% CO₂ sont réalisés pour différents courants.

3.3. Etude de l'arc

S.W. Simpson, P. Xu et M. Rados [50] modélisent de l'arc de soudage en l'assimilant à un circuit électrique et un circuit thermique. Les résultats sont présentés sous forme de graphes donnant, d'une part le courant d'arc en fonction de la tension, et comparés à des mesures réalisées avec un mélange argon-oxygène-CO₂. L'évolution du courant, de la tension et de la longueur d'arc est donnée au cours du temps. Les auteurs mettent en évidence la transition entre le régime de court-circuit et le régime globulaire ou celui de pulvérisation axiale.

J.Haidar présente dans plusieurs articles [51, 52, 53, 54, 55 et 56] la modélisation en soudage MIG de l'arc, incluant l'électrode, le plasma et la pièce. Un autre article consacré spécifiquement au soudage TIG [57] est présenté plus loin. Les calculs sont faits pour un fil de 1,6 mm de diamètre, le plasma étant supposé à l'équilibre thermodynamique local (ETL) et l'écoulement laminaire. Le pas de calcul est de 75 µm au niveau des électrodes. Le modèle prend en compte des composantes axiale et radiale du courant. La force de tension de surface est déterminée d'après la courbure de la goutte : elle vaut 1,2 N.m⁻¹ à 275 A. La température présente un maximum de 19000 K sur l'axe de l'arc, la température maximale de la goutte étant de 2900 K. Pour un courant de 325 A, la température de l'arc atteint 25000 K et la fréquence de détachement des gouttes atteint 230 Hz. Les résultats montrent que la force magnétique radiale est prépondérante pour le détachement des gouttes. La pression et la traînée visqueuse du plasma se compensent. La force magnétique axiale aide au détachement, mais est plus faible. L'effet de la pesanteur est plus important en régime globulaire qu'en régime de pulvérisation axiale.

R.T.Deam, S.W.Simpson et J.Haidar [58] étudient la formation des fumées qui proviennent de la condensation des vapeurs métalliques et des particules de moins de 0,1 µm. Ils montrent que ces fumées sont d'autant moins importantes que les gouttes sont petites. Ils considèrent que l'arc est accroché sous la goutte en régime globulaire, mais qu'il l'enveloppe totalement en régime de pulvérisation axiale; les vapeurs métalliques et le gaz plasmagène (argon) sont mélangés. L'évaporation à l'anode n'est pas considérée comme un terme de refroidissement. La transmission de la chaleur est modélisée par une conduction à 1 dimension et constitue le seul terme de chauffage des gouttes traversant le plasma, car le courant n'est pas supposé les traverser. Cela nécessiterait en

effet une émission d'électron en surface des gouttes, alors que le fer n'est pas thermoïonique. La convection dans la goutte change en fonction du volume et de la forme de la goutte. La vitesse du plasma sur l'axe de l'arc est calculée à plusieurs centaines de mètres par seconde.

F.Wang, W.K.Hou, S.J.Hu *et al.* [59] modélisent le soudage MIG-MAG en utilisant une combinaison des méthodes du volume de fluide, de l'enthalpie et de la viscosité efficace. La partie fondue du fil-anode s'allonge dans la plasma : la réduction de diamètre du fil limite le transfert de chaleur de la partie non fondue vers l'extrémité de l'électrode, réduit le taux de fusion du métal et favorise la transition vers le régime globulaire. Le domaine de calcul s'étend du tube-contact à la zone juste au-dessus du cordon. Des observations de la microstructure de l'électrode sont réalisées pour étudier la limite de fusion de l'électrode, en régime globulaire et en régime de pulvérisation axiale.

G.Wang, P.G.Huang et Y.M.Zhang [60] développent une modélisation basée sur les méthodes du volume de fluide (surface libre de la goutte) et de force surfacique continue pour la tension de surface, pour étudier la transition entre les régimes globulaires et de pulvérisation axiale en soudage MIG-MAG. La distribution de densité de courant est supposée Gaussienne.

H.G.Fan et R.Kovacevic [61] étudient le régime globulaire par un modèle complet prenant en compte le transfert thermique dans l'électrode et le bain de fusion, le détachement des gouttes et leur chute dans le plasma. Des mesures par imagerie rapide ($250 \text{ images.s}^{-1}$, rétro-éclairage laser) sont réalisées sous argon à 160 ampères. Le modèle est basé sur les hypothèses de symétrie axiale, et d'écoulement laminaire d'un plasma d'argon pur en l'ETL. Le chauffage des gouttes traversant le plasma est négligé car compensé par la vaporisation. La dynamique de formation des gouttes, de leur détachement jusqu'à l'impact sur le bain fondu, est calculée. Les résultats du modèle concernant la formation et le transfert des gouttes sont en accord avec les résultats expérimentaux obtenus. La densité de courant atteint son maximum au niveau de l'étranglement de la goutte. Lorsqu'elle est détachée, la densité de courant est plus importante au niveau de la goutte car la conductivité du métal liquide est supérieure à celle du plasma. La température est maximale là où la densité de courant est la plus élevée, c'est à dire autour de la goutte, sur l'axe au voisinage de la goutte et autour des gouttes transférées. Les forces électromagnétiques ont une forte influence sur le détachement des gouttes. La modélisation prend également en compte le détachement de la dernière goutte après extinction de l'arc et son transfert au bain de métal fondu.

K.Ramachandran, J.-L.Marqués, R.Vaßen *et al.* [62] présentent un modèle 3D d'une torche de dépôt par pulvérisation, pour des courants de 400 et 500 A. Le plasma est supposé en ETL. La température et la vitesse du plasma sont calculées pour différents gaz (argon et mélange argon-hydrogène). Les résultats montrent que l'augmentation du courant entraîne une diminution de la longueur d'arc et une augmentation de son rayon, alors qu'une diminution du flux de gaz produit l'effet inverse. L'ajout d'hydrogène provoque des pics plus prononcés de température et de vitesse du plasma en sortie de la buse.

S.Tashiro, M.Tanaka, M.Ushio *et al.* [63] étudient l'influence du CO_2 sur la constriction de l'arc. Le modèle est appliqué au cas d'une torche TIG à géométrie cylindrique, avec un plasma en ETL. Les distributions de température, de vitesse de l'écoulement, de densité de courant et de flux de chaleur sont calculées pour un courant de 150 A, pour l'argon, l'hélium et le CO_2 . Il en découle que la température et le transfert thermique sont plus importants pour le CO_2 qu'avec les autres gaz.

3.4. Modèles pour l'arc de type TIG

J.Haidar [57] présente un modèle à deux températures d'un arc TIG dans une géométrie à symétrie cylindrique, pour un courant de 200 A. L'hypothèse d'ETL partiel est utilisée, et l'écart entre les températures des électrons et des lourds est évalué en fonction de la hauteur dans l'arc.

L.Sansonnens, J.Haidar et J.J.Lowke [64] étudient l'arc TIG avec un modèle 2D prenant en compte la diffusion ambipolaire dans l'ensemble du plasma. Ils étudient différentes valeurs de la

fonction de travail de l'électrode. Pour des courants élevés (200 A) la chute de tension à l'anode est négative.

A.De et T.DebRoy [65] développent un modèle 3D de l'arc TIG avec une approche phénoménologique utilisant la méthode de Levenberg-Marquardt pour déterminer les valeurs optimales de cinq paramètres de soudage : l'efficacité, le rayon et le paramètre de distribution de l'arc, la conductivité thermique effective et la viscosité effective du métal liquide. La qualité du cordon (largeur, profondeur de pénétration) est évaluée en fonction de ces paramètres.

F.Lu, S.Yao, S.Lou *et al.* [66] étudient l'arc TIG avec un modèle à symétrie radiale, en supposant l'ETL et un écoulement laminaire. La résolution se fait avec un calcul par éléments finis. Les distributions de température et de courant sont calculées dans l'arc, tandis que la densité de courant, la force électromagnétique et l'écoulement de matière sont calculés dans la zone fondue.

F.Lago, J.J.Gonzalez, P Freton *et al.* présentent dans deux articles [67 et 68] la modélisation de l'accrochage de l'arc avec le code FLUENT. Dans le premier les auteurs valident un modèle 2D (symétrie axiale) pour une configuration TIG (électrode en tungstène, plaque-anode en cuivre, fer ou aluminium pour des courants de 100 à 200 A). Le plasma, considéré comme un fluide Newtonien, est supposé à l'ETL ; l'écoulement est laminaire et stationnaire. La surface de l'anode est considérée indéformable, et la gaine anodique est modélisée par un conducteur ohmique. Le bain de fusion et la cathode ne sont pas modélisés. L'influence des vapeurs métalliques (issues de l'anode) est étudiée à partir du coefficient de transport. Les isothermes de température et de densité de courant, ainsi que le flux thermique à l'anode sont calculés dans le cas d'un plasma d'argon pour une anode en cuivre ou en fer. Les auteurs montrent que le flux radiatif du plasma est faible par rapport au flux vers l'anode (15%), et que l'échange radiatif entre le plasma et l'anode peut être négligé. La présence des vapeurs métalliques augmente la densité de courant au centre de l'arc (augmentation de la conductivité) et la diminue à la périphérie (pertes radiatives).

Dans le deuxième article [68], le modèle précédent est prolongé en 3D, avec un plasma d'argon et une cathode en cuivre. L'influence d'un champ magnétique extérieur est étudiée. Il est produit par un fil infini situé à 20 mm de l'axe de la colonne et parcouru par un courant de 40 à 160 A. La force de Lorentz produite est ajoutée à celle produite par le courant de l'arc. Le champ thermique et les vecteurs vitesse de l'argon sont calculés pour un champ de 3,5 mT (35 Gauss). La configuration d'un fil parcouru par le même courant que celui de l'arc, distant de 22 cm, est ensuite étudiée. L'influence d'un flux perpendiculaire est également modélisée. La force appliquée cause une augmentation du flux total, et donc de la température maximale de l'anode.

M.Tanaka, M.Ushio et J.Lowke [69] étudient la fusion de l'anode en soudage TIG à l'aide d'un modèle prenant en compte la cathode en tungstène, le plasma et l'anode, pour un courant de 150 A et sous différents gaz de protection (argon, hélium). Le modèle utilise une géométrie cylindrique à symétrie axiale ; le plasma est supposé à l'ETL et l'anode est considérée plate et non perturbée par la pression du plasma. Les équations différentielles sont résolues selon la procédure SIMPLEC. La densité de courant et les profils de vitesse sont calculés pour l'argon et l'hélium. L'effet Marangoni est dominant pour les deux gaz ; la force d'entraînement du plasma est prépondérante pour l'argon, alors que c'est la force électromagnétique qui est dominante dans l'hélium.

J.J.Lowke, M.Tanaka et M.Ushio [70] étudient l'influence en soudage TIG d'un flux, constitué d'oxydes métalliques, déposé à la surface de la plaque-anode, sur le cordon de soudure réalisé. La présence d'ions négatifs et l'augmentation de la densité de courant au centre de l'arc provoquent une constriction de la colonne de plasma. Le calcul de l'effet Marangoni a été réalisé pour un courant de 200 A.

J.J.Lowke et M.Tanaka [71] présentent la modélisation d'un arc électrique de type TIG dans le cadre de l'hypothèse de l'ETL pour des courants de 100 à 200 ampères. Au niveau des électrodes, le

pas de la grille de calcul utilisée est égal à la longueur de diffusion des électrons. La température et la densité électronique sont calculées au niveau de l'anode et de la cathode.

R.Bini, M.Monno et M.I. Boulos [72] présentent un modèle 2D d'un arc transféré (de type TIG), pour un courant de 200 A et une distance entre les électrodes de 10 à 20 mm. Le plasma est supposé à l'ETL. Les résultats sont comparés à des mesures par calorimétrie et par spectroscopie, avec l'étude de l'émissivité absolue d'une raie de l'argon neutre.

H. P.Li et M.S.Benilov [73] évaluent le transfert de chaleur dans la gaine cathodique des arcs. Les calculs réalisés donnent une température inférieure à celle obtenue à partir de l'hypothèse d'ETL. La configuration étudiée est une cathode en pointe et une plaque servant d'anode. Le champ électrique dans la colonne d'arc est modélisé jusqu'à 100 A. L'évolution de température en fonction de la hauteur entre la cathode et l'anode est calculée pour trois courants (10, 50 et 100 A) en utilisant l'hypothèse d'ETL et un modèle à deux températures. L'énergie apportée à l'arc est modélisée pour un courant de 0 à 200 A. Il est montré que c'est la gaine cathodique qui chauffe le plasma et non l'inverse, l'énergie quittant la gaine vers la cathode mais aussi le plasma. Ce résultat confirme l'hypothèse de chauffage surfacique non linéaire. Le modèle utilisant l'ETL ne rend pas compte de la distribution de température dans la zone cathodique, il faut utiliser un modèle à deux températures.

4. OBSERVATION DE L'ARC

L'utilisation de cinématographie rapide pour étudier l'arc de soudage est assez ancienne. L'usage des capteurs CCD, puis CMOS, a grandement facilité l'acquisition tout en autorisant de meilleures résolutions pour des vitesses d'enregistrement élevées. Dans la très grande majorité des travaux un éclairage laser infrarouge est utilisé ; l'image acquise correspond alors à l'ombre des gouttes projetées. Certains auteurs utilisent également des rayons X comme source lumineuse.

C.D.Allemand, R.Schoeder, D.Ries et T.W.Eagar [74] présentent un dispositif d'observation de l'arc par rétro-éclairage laser. Le faisceau d'un laser He-Ne est étalé pour couvrir la zone de chute des gouttes dont l'ombre est focalisée sur le capteur optique. Des filtres permettent de régler l'intensité lumineuse captée pour supprimer totalement ou partiellement la lumière de l'arc.

H.Waszink et J.Piena [75] étudient le taux de fusion des électrodes enrobées et les transferts thermiques dans la goutte pendante. Le transfert de métal est observé par imagerie rapide ($1000 \text{ images.s}^{-1}$) avec rétro-éclairage par rayons X. Les résultats montrent que les forces électromagnétiques sont prépondérantes dans le détachement des gouttes.

J.H.Chen, D.Fan, Z.Q.He, J.Ye *et al.* [76] étudient le régime globulaire en soudage à l'électrode enrobée par imagerie rapide ($1000 \text{ images.s}^{-1}$) en rétro-éclairage laser et par rayons X ($250 \text{ images.s}^{-1}$), mais également en enregistrant le son de l'arc et les signaux de courant. Les auteurs montrent que la tension de surface retient la goutte à l'extrémité du fil, et que son détachement résulte de l'amplification de ses oscillations. La pesanteur est un effet minoritaire. La tension de surface est mesurée par la méthode de Rayleigh (mesure des oscillations de la goutte pendante)

S.Liu et T.A.Siewert [77] utilisent les enregistrements de tension d'arc pour étudier la fréquence des gouttes transférées pour différents régimes de fonctionnement. Les gouttes sont observées par rétro-éclairage laser à $300 \text{ images.s}^{-1}$. Le régime globulaire est particulièrement étudié, et des valeurs optimales de tension sont proposées pour obtenir un fonctionnement correct.

S.Subramaniam, D.R.White, D.J.Scholl *et al.* [78] mesurent dans un premier article la tension de surface des gouttes en soudage MIG pulsé. La fréquence d'oscillation des gouttes (déterminée par la méthode de Rayleigh) est mesurée à partir de l'observation par rétro-éclairage laser à $4500 \text{ images.s}^{-1}$. La tension de surface est alors obtenue en résolvant l'équation de Navier-Stokes par la méthode des éléments finis. Les auteurs présentent dans un second article [79] des résultats

obtenus en courant pulsé. La section des gouttes est modélisée par un ellipsoïde pour les calculs. La présence du CO₂ ou d'O₂ diminue la tension de surface, ainsi que l'ajout de soufre.

Q.Lin, X.Li et S.W. Simpson [80] étudient la transition entre les régimes globulaire et de pulvérisation axiale par rétro-éclairage laser, avec un enregistrement à 50 images.s⁻¹. L'analyse par transformée de Fourier rapide du signal de tension est effectuée. La vitesse des gouttes est mesurée avec des photodiodes et comparée à un modèle basé sur la constriction magnétique. Les résultats montrent que l'évolution de la taille des gouttes n'est pas continue au passage de la transition. La vitesse des gouttes mesurée est en bon accord avec un modèle basé sur l'effet de pincement par la force électromagnétique.

C.Xu, H.Gao et L.Wu [81] présentent une procédure d'étude monochromatique de la lumière émise par un arc TIG fonctionnant sous 200 A. L'observation est réalisée avec un filtre interférentiel centré à 667 nm (largeur de 10 nm). Cette gamme correspond au fond continu de l'argon. La fréquence d'acquisition est de 1000 images.s⁻¹ pour une taille d'image de 260×260 pixels. Les données sont associées à des mesures spectroscopiques de la densité N_e et de la température électronique T_e , dans le but de corrélérer les images obtenues avec les caractéristiques du plasma (N_e et T_e).

Z.Sun, Q.Chen, W.Zhang *et al.* [82] étudient un dispositif de visualisation du bain de métal en soudage par court-circuits sous CO₂. L'acquisition des images est synchronisée aux instants de court-circuits. La taille des images est de 768×576 pixels pour une résolution 30,3 μm par 20,8 μm). La fréquence d'acquisition est de 17 images.s⁻¹. Un programme d'analyse des données permet d'évaluer la qualité de la soudure en fonction des paramètres du bain de métal fondu.

Y.M.Zhang, H.S.Song et G.Saeed [83] développent une méthode d'étude du bain fondu en utilisant sa nature spéculaire. Les essais sont réalisés en soudage TIG pour un courant de 45 A. Le bain est éclairé avec un laser de 20 mW à 685 nm séparé en cinq lignes. La lumière réfléchie est observée avec une caméra équipée d'un filtre passe-bande centré sur cette longueur d'onde.

Z.Guangjun, Y.Zhihong et W.Lin [84] étudient différents algorithmes permettant d'obtenir un modèle 3D du bain fondu à partir d'images 2D en soudage MIG pulsé. Les résultats sont validés par une étude micrographique du cordon.

D.D.Harwig, J.E.Dierkshiede D.Yapp et S.Blackman [85] étudient le taux de fusion en soudage MAG en polarité variable. Les mesures sont effectuées avec un fil 70 S de diamètre 1,14 mm, sous 10% de CO₂. La fusion de l'électrode est étudiée par la méthode du taux de fusion des gouttes. La fréquence d'acquisition est de 3700 Hz pour une taille d'image de 512×512 pixels (capteur CMOS). Le temps d'obturation est choisi à 70 μs pour ne pas nécessiter d'éclairage laser supplémentaire. L'extension de l'électrode est mesurée à chaque étape du détachement de la goutte. Lorsque l'arc est accroché à la base de la goutte, le taux de fusion diminue jusqu'au détachement. Lorsque l'arc entoure la goutte, le taux de fusion augmente jusqu'à ce que sa taille devienne telle que la masse à chauffer soit trop importante. Un palier dans la vitesse de fusion est alors observé.

Z.Z.Wang et Y.M.Zhang [86] étudient les gouttes transférées dans l'arc avec un algorithme de traitement d'image basé sur la luminosité des gouttes. La vitesse d'acquisition est de 3000 images.s⁻¹, avec une observation directe de l'arc (sans éclairage supplémentaire).

5. ETUDE SPECTROSCOPIQUE

L'étude spectroscopique est particulièrement utile à l'analyse des arcs de soudage car elle permet une étude non-intrusive du procédé. C'est par ailleurs le seul moyen de mesurer les températures très élevées rencontrées (plus de 10 000 K), la pyrométrie étant limitée, pour une précision acceptable, à quelques milliers de degrés

5.1. Diagnostic de l'arc par spectroscopie optique d'émission

I.L.Babich, A.N.Veklich, V.A.Zhovtyanskii et A.I.Cheredarchuk [87] calculent la concentration des vapeurs métalliques à partir de mesures spectroscopiques pour un arc contenant du cuivre, en étudiant les rapports d'intensité de raies de cet élément. Un modèle théorique basé sur l'ETL partiel est développé.

F.Könemann, G.Kühn, J.Reiche et M.Kock [88] étudient un plasma à faible courant (10 à 15 A) par spectroscopie optique d'émission. La température est calculée à partir de l'hypothèse d'ETL (relation de Saha-Boltzmann) et avec un modèle à deux températures au niveau de la cathode.

L.O.Vilarinho et A.Scotti [89] étudient un arc TIG à bas courant en employant une méthode de Fowler-Milne modifiée dans la gamme des basses températures (< 10000 K) où les équations de l'ETL sont modifiées pour prendre en compte une distribution linéaire de la population des niveaux d'énergie. Les mesures sont obtenues en utilisant 24 points de mesure par des fibres optiques. L'inversion d'Abel est effectuée sur une moitié de l'arc. Si la méthode de Fowler-Milnes est adaptée au diagnostic du soudage TIG, elle ne peut être utilisée pour le cas du soudage MIG-MAG. En effet la présence importante de vapeurs métalliques entraîne une variation de la composition du plasma selon le rayon et rend impossible le calcul des rapports d'intensité.

G.Kühn et M.Kock [90] étudient la région cathodique d'un arc éclatant dans l'argon à pression atmosphérique, à faible courant (12,5 A), pour déterminer le rapport de température entre le gaz et les électrons. Les électrodes sont en tungstène et la décharge fonctionne en mode diffus (le plasma entoure complètement l'extrémité de la cathode). L'allumage de l'arc est assuré par la focalisation d'un laser YAG. La fente d'entrée du monochromateur utilisé est fixée à 50 μm . Le dispositif optique est calibré en énergie en utilisant une lampe à ruban de tungstène. Les données sont traitées après inversion d'Abel, réalisée avec une méthode basée sur la transformée de Fourier. Le coefficient d'émission du fond continu est déterminé dans la zone spectrale 4454 – 4456 Å. Les distributions radiales de température et de densité électronique à différentes hauteurs dans la colonne d'arc, sont déterminées en utilisant la relation de Saha-Boltzmann. L'écart entre les températures des électrons et des lourds (gaz) est étudié par la méthode de relaxation en utilisant une caméra intensifiée. Les paramètres (température et densité électronique, rapport des températures) de l'équilibre thermodynamique local partiel étant déterminés, le modèle est utilisé pour calculer le facteur de sous-population et la valeur de champ électrique dans le plasma.

Y.T.Cho et S.J.Na [91] présentent de nouvelles méthodes de calcul de l'inversion d'Abel pour des sources de symétrie circulaire et elliptique. La matrice d'aire développée permet un calcul rapide. Le modèle est appliqué en exemple à l'étude d'un plasma d'arc de 100 A de type TIG.

M.Redwitz, O.Langenscheidt et J.Mentel [92] développent un dispositif spectroscopique pour étudier une décharge entre deux électrodes en tungstène, pour des courants de 0,5 à 10 A et des pressions de 1 à 3 bars. La température électronique est calculée avec la méthode des graphes de Boltzmann, et la densité électronique est obtenue à partir de l'étude du fond continu. La lumière du plasma est focalisée par des lentilles achromatiques ; un prisme de Dove est utilisé pour ajuster l'angle entre l'image de la décharge et la fente d'entrée du spectromètre. Les auteurs étudient le centre du plasma, amis également l'accrochage aux électrodes où ils montrent que l'ETL n'est plus vérifié.

J.Mirapeix, A.Cobo, O.M.Conde, C.Jaúregui *et al.* [93] déterminent la température par la méthode de Boltzmann en temps réel en utilisant un algorithme inter-pixel qui permet de déterminer rapidement la longueur d'onde centrale d'un pic d'émission. Les essais sont réalisés en soudage TIG. la lumière est collectée par une fibre optique. La résolution du spectromètre est de 0,3 nm. Les raies de différents éléments sont étudiées ; les mesures sont effectuées avec celles de fer I et d'argon II. Les résultats sont appliqués à la détection de défauts de soudage, qui se traduisent par une fluctuation de la température électronique. Dans un second article [94], ils appliquent la méthode au

contrôle de l'arc et à la détection des défauts. Les raies sont analysées par trois différents algorithmes d'interpolation inter-pixel, pour calculer la température par la méthode des graphes de Boltzmann.

J.Torres, M.J.van de Sande, J.J.A.M.van der Mullen, A.Gamero et A.Sola ont développé une méthode permettant d'obtenir la température et la densité électronique d'un plasma à partir de la mesure de l'élargissement Stark de deux raies : c'est celle qui a été retenue pour réaliser le diagnostic du plasma présenté au chapitre IV.3. Dans un premier articles [95], les auteurs appliquent leur méthode à l'étude d'un plasma d'hydrogène entretenu par micro-ondes. Les raies étudiées sont celles de la série de Balmer de l'hydrogène. Dans un second article [96], ils présentent des résultats obtenus dans des plasmas d'argon et d'hélium.

S.C.A.Alfaro, D. de S.Mendonça et M.S.Matos [97] mesurent la température électronique à partir de l'étude de raies du fer et du manganèse, en appliquant les lois de Boltzmann et de Saha sous hypothèse de l'existence de l'ETL dans le plasma. La lumière de l'arc est collectée au moyen d'une fibre optique ; le spectromètre utilisé a une résolution de 0,3 nm. Les mesures sont réalisées sous argon + 34% de CO₂, pour des courants de 140, 150 et 200 A. Le diamètre du fil est de 0,8 mm. L'évolution de la température est utilisée pour détecter les défauts de soudage. La méthode utilisée ne nécessite pas d'inversion d'Abel. Pour vérification, la température est calculée pour un courant de 118 A et comparée aux valeurs disponibles dans la littérature. Les mesures basées sur les raies du fer donnent une température de 7154 K, celles basées sur les raies du manganèse une température de 18000 K. L'écart est attribué à la répartition non homogène des vapeurs métalliques.

P.Teulet, L.Girard, M. Razafinimanana, A.Gleizes *et al.* [26] présentent l'étude spectroscopique du plasma d'une torche de coupage : la température et la densité électronique sont mesurées par spectroscopie optique d'émission. Plusieurs techniques sont utilisées (Fowler-Mines, mesure de l'élargissement Stark) à partir de raies de l'hydrogène et de l'oxygène. L'inversion d'Abel est réalisée par deux méthodes (transformée de Fourier et méthode des moindres carrés).

5.2. Autres diagnostics spectroscopiques

Certains auteurs utilisent l'étude du spectre global de l'arc, plutôt que de réaliser un diagnostic à partir des raies d'émission. Cette méthode simplifiée présente l'avantage d'être suffisamment facile à mettre en œuvre pour envisager une utilisation en temps réel comme moyen de contrôle du procédé.

G.Agapiou, C.Kasiouras et A.A.Serafetinides [98] étudient le spectre de 150 à 970 nm (l'absorption des UV par l'air est prise en compte) pour valider une méthode de contrôle du procédé. Un dispositif de suivi de joint utilisant une diode laser d'éclairage de 30 mW est employé. L'étude du spectre complet est réalisée en trois fois avec un spectrographe SPEX (modèle 1679 F), pour différents courants : 100, 120, 140 et 160 A sous argon. L'émission est composée d'un fond continu et de raies d'émissions. A pression atmosphérique, les raies sont altérées par élargissement collisionnel et par élargissement Doppler (haute température). Les raies sont étudiées avec une résolution assez faible et le spectre fait apparaître des maxima (ensemble de raies non séparées) plutôt que des raies isolées. Les maxima sont larges de plusieurs nanomètres, et les auteurs montrent que la répartition de ces extremums ne dépend pas du courant.

H.GuoMing, Y.ShaoHui, C.XinHua et L.JunYue [99] étudient le spectre d'émission du plasma pour les différents régimes de transfert. L'évolution temporelle de raies représentatives est étudiée et couplée à l'enregistrement vidéo avec rétro-éclairage laser. Un programme de reconnaissance de motif est utilisé pour classer les différents régimes de soudage observés.

Enfin, des études par spectrométrie laser sont réalisées sur des arcs électriques de type TIG :

- H.Terasaki, M.Tanaka et M.Ushio [100] mesurent l'effet des vapeurs métalliques en soudage TIG par diffusion Thomson, ce qui ne nécessite pas d'hypothèse sur l'ETL. Les vapeurs métalliques diminuent fortement la température électronique : l'écart atteint 6000 K. Deux

mécanismes de perte sont présentés :

- . l'augmentation de la conductivité électrique réduit le champs et donc l'accélération des électrons ; l'arc s'élargit et sa température diminue.
- . les vapeurs métalliques présentant une émissivité plus importante, les pertes en énergie sont plus grandes.

G.Yang et J.Heberlein [101] étudient de la région anodique d'un arc produit par une torche à plasma (configuration similaire au TIG) par diffusion Thomson et y déterminent la température et la densité électronique. Les régimes transitoires sont étudiés au niveau de l'accrochage de l'arc à l'anode.

6. LES FILS FOURRES

Les fils fourrés présentent de nombreux avantages en terme de commodité d'emploi ou de productivité. Cependant, la grande majorité des articles traitant de ce type de fil concerne l'étude des propriétés mécaniques du cordon réalisé ou du fonctionnement pratique du procédé. Les articles présentés traitent par contre des fils fourrés de la même manière que ceux détaillés précédemment pour les fils pleins.

R.M.Mirza et R.Gee [102] étudient l'influence du taux de CO₂ dans le gaz de protection sur la quantité d'hydrogène présent dans le cordon. Ils montrent que le passage en régime globulaire, qui résulte d'un taux élevé de dioxyde de carbone, réduit la quantité d'hydrogène, car l'adsorption est moins importante pour des grosses gouttes. L'observation au microscope d'une section de l'anode montre que le flux n'est pas fondu au-delà de la goutte.

W.Wang, S.Liu et J.E.Jones [103] étudient les différents régimes de soudage en fil fourré en mettant en œuvre diverses méthodes : analyse du signal électrique par transformée de Fourier rapide ; comptage statistique au microscope des projections récupérées ; imagerie rapide (1000 images.s⁻¹, avec une résolution de 100 μm). Leurs résultats montrent que les différents régimes semblent coexister.

M.T.Liao et W.J.Chen [104] étudient le soudage sous argon, d'une part sous 200 A, en fil massif, et avec 2, 10 et 20% de CO₂ dans le gaz de protection ; d'autre part sous 180 A en fil fourré, avec 20, 40, 60, 80 et 100% de CO₂. Ils comparent les propriétés mécaniques du joint réalisé. Leurs résultats indiquent que la présence du flux génère plus de projections lors de l'utilisation des fils fourrés. Par ailleurs, si la composition du gaz n'affecte pas le taux de projection quel que soit le type de fil utilisé, son influence sur la composition chimique de la soudure réalisée est très importante avec des fils massifs, et plus faible avec les fils fourrés.

D.E.Clark, A.D.Watkins et P.E.Murray [105] ont étudié les différents régimes de transfert en fil fourrés. Les essais sont réalisés pour des courants de 130 à 380 A sous CO₂ et argon + 2% O₂, en position horizontale. L'arc est observé par imagerie rapide (3000 images.s⁻¹, rétro-éclairage laser) et les signaux électriques sont traités par transformée de Fourier rapide pour faire apparaître les fréquences caractéristiques du détachement des gouttes. Les gouttes plus grosses que le diamètre du fil sont associées au régime globulaire, mais le transfert est plus irrégulier en fil fourré. Un régime de court-circuits avec contact entre le flux fondu et la pièce est observé.

E Bauné, C.Bonnet et S.Liu [106] ont étudié en soudage par fil fourré, l'influence des terres rares sur la concentration en oxygène du métal déposé, et comparé leurs résultats à ceux obtenus avec les désoxydants classiques (Si, Mn, Ti etAl).

M.Suban et J.Tusek [16] ont évalué le taux de fusion du fil, et proposé des équations d'évolution pour les fils massifs et les fils fourrés. D'après eux, la plus grande vitesse de fusion observé pour les fils fourrés s'explique par la plus grande densité d'énergie dans l'enveloppe qui assure l'essentiel du passage du courant (le flux est moins ou pas conducteur). Pour le soudage en polarité négative, la fusion est plus rapide en raison d'une plus forte chute de tension cathodique,

mais également parce que la tache cathodique est très localisée et se déplace rapidement, contrairement à l'attachement sur l'anode. Les conductivités thermiques et électriques des différents gaz sont comparées, et un procédé (TIME) utilisant un mélange à 4 gaz est présenté. Des essais sont réalisés sous argon, CO₂, Ar + 18% CO₂ et le nouveau mélange, successivement avec un fil massif et un fil fourré (rutile) pour comparer le taux de fusion. Le courant varie de 100 à 450 A. Les auteurs développent un modèle mathématique pour déterminer les taux de fusion, et ils montrent que l'influence du courant sur le taux de fusion est semblable pour tous les gaz.

N.M.Ramini de Rissone, H.G.Svoboda, E.S.Surian *et al.* [107] ont testé des fils fourrés métalliques pour différents gaz (CO₂ et argon + 20% CO₂) à faible courant (entre 100 et 200 A). Le soudage est effectué à plat ou en remontant. Les propriétés mécaniques du cordon sont analysées et le métal est observé au microscope optique.

N.T.Jenkins, W.M.-G.Pierce et T.W.Eagar [108] ont étudié les fumées produites sous différents régimes de soudage (globulaire, pulvérisation axiale) en fil massif, mais également dans le cas d'un fil fourré prévu pour être utilisé sans gaz de protection. Les auteurs comparent pour les différents cas la répartition entre les particules d'un diamètre supérieur au micron (micro-projections) et celles d'un diamètre inférieur (particules agglomérées). En soudage avec un fil massif, les micro-projections représentent moins de 10% des fumées en poids, pour tous les régimes. En fil fourré elles en représentent environ 30%.

T.Kannana et N.Murugan [109] étudient l'influence des paramètres de soudages (courant et vitesse de soudage, distance à la pièce et angle de la torche) pour des fils fourrés destinés à la soudure de l'acier inoxydable. Le gaz de protection utilisé est le CO₂. La section du cordon de soudure est ensuite analysée. Les paramètres et les résultats sont rassemblés dans une matrice servant de base à un modèle mathématique permettant d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur chaque critère de qualité du cordon : dilution, pénétration, largeur du bain, renforcement de la dureté.

S.Mukhopadhyay et T.K.Pal [110] étudient l'influence du gaz de protection sur le soudage d'un acier haute performance (700 Mpa) sous différents gaz de protection, avec des fils massifs et des fils fourrés. Les gaz testés sont des mélanges argon-CO₂ et des mélanges ternaires argon-CO₂-O₂. La microstructure du cordon est analysée au MEB :

- des précipités d'éléments minoritaires (Al, Si, Mn, Ti) sont observées dans la ferrite ; leur forme est généralement circulaire.
- Lors de l'utilisation de fils fourrés, les quantités de silicium et de manganèse dans le cordon de soudage diminuent légèrement lorsque la concentration en oxygène dans le gaz de protection augmente. Pour une température supérieure à 2000°C, le silicium et le manganèse ne jouent plus le rôle de désoxydant et le taux d'oxygène dans le cordon augmente. Lors du refroidissement, l'oxygène excédentaire précipite en micro-particules.

S-G.Liu, J-M.Wu, S-C.Zhang *et al.* [111] ont étudié des fils fourrés testés pour le dépôt de métal par pulvérisation. Trois composés de titane et d'aluminium sont testés pour des applications de revêtements protecteurs.

P.K.Palani et N.Murugan développent dans un premier article [112] un modèle mathématique pour étudier le bain de fusion. Pour servir de base au modèle, des essais sont réalisés avec un fil fourré (Cr + Ni) sous 5% de CO₂ pour un courant de 176 à 244 A ; la torche fait un angle de 90° avec la pièce. L'influence de la distance de la torche à la pièce est évaluée avec l'analyse de la section du cordon. Dans un second article [113], ils étudient expérimentalement l'influence des paramètres de soudage (vitesse de soudage, distance torche-pièce, courant) sur la qualité du cordon pour un fil fourré inox. Les résultats sont utilisés pour réaliser un programme d'optimisation, et les auteurs montrent que le courant et la distance de la torche à la pièce sont les paramètres prépondérants.

7. SYNTHÈSE

Les deux principaux paramètres utilisés dans les différentes études sont le courant d'arc et la composition du gaz de protection. Ce dernier est généralement l'argon ou un mélange argon/CO₂ mais des mélanges avec d'autres gaz sont également employés : H, He ou O₂ [14, 15]

Certaines études prennent en compte l'influence du diamètre de l'électrode [10] ou sa composition avec l'utilisation de fils fourrés [102 à 113].

La mesure des paramètres électriques (courant, tension) constitue un diagnostic simple qui est employé dans une majorité d'études expérimentales [3, 4, 7, 10, 15, 16, 18, 31, 32, 50, 76, 105], souvent en complément d'analyses plus complexes. L'imagerie de l'arc est utilisée par de nombreux auteurs [9, 10, 25, 36, 40, 61, 75 à 86, 103] pour étudier le transfert de métal. La fréquence caractéristique de ce phénomène étant de plusieurs centaines de Hertz, la vitesse d'acquisition peut atteindre plusieurs milliers d'images par seconde. Le procédé le plus répandu est d'utiliser un éclairage laser situé derrière l'arc qui permet d'observer l'ombre des gouttes de métal et de l'électrode. Certaines études utilisent la lumière émise par l'arc [86] ou un éclairage par rayons X [75].

Puisque la finalité du soudage est la réalisation d'une liaison entre deux pièces métalliques, une grande partie des travaux disponibles dans la littérature concerne l'étude du cordon [17, 19 à 24, 27 à 30, 48, 65, 84, 102, 104, 106, 109, 110], dans le but de déterminer ses propriétés mécaniques. Les modèles permettent de calculer la distribution de températures et de forces dans le bain, avec la prise en compte de l'impact des gouttes. L'observation en microscopie de coupes de la pièce soudée constitue l'analyse la plus fréquente ; certains travaux utilisent la thermographie [12] ou la pyrométrie [8, 25] pour suivre l'évolution du cordon pendant le soudage. Par contre l'électrode consommable est moins fréquemment étudiée [59, 102].

L'étude de l'arc de soudage par spectroscopie optique d'émission est présentée dans plusieurs travaux [93, 97, 98, 99]. L'effet des vapeurs métalliques sur la diminution de la température est notamment relevé [100]. La température électronique est calculée le plus souvent avec la méthode des graphes de Boltzmann [88, 90, 92, 93, 94], la distribution radiale de l'émissivité nécessitant d'effectuer l'inversion d'Abel. Certains auteurs [97] proposent cependant une méthode permettant de s'en dispenser. Les résultats sont appliqués le plus souvent au contrôle du procédé.

La modélisation du plasma permet de calculer les différentes grandeurs caractéristiques du plasma, notamment la distribution de température, de champ électrique et de forces électromagnétiques. Tous les modèles de l'arc MIG-MAG prévoient une température maximale sur l'axe de la colonne, avec une valeur de l'ordre de 20000 K [38, 52].

Enfin certains travaux concernent l'étude des fumées [13, 18, 58, 108] et des projections [5, 11, 32, 104], par la modélisation et l'analyse expérimentale.

La formation des gouttes est étudiée expérimentalement, notamment par imagerie rapide. La modélisation de la formation et du détachement des gouttes met en évidence le rôle prépondérant de la tension de surface et de la force électromagnétique, agissant respectivement comme force d'attachement et de détachement. Le passage en régime globulaire est interprété comme la diminution ou l'inversion du signe de la force électromagnétique, résultant de la modification de la géométrie des lignes de courant. Même si les résultats montrent l'importance de la composante radiale de la force électromagnétique et une rotation du métal liquide formant la goutte, celle-ci est toujours considérée se former dans l'axe du fil électrode. Les modèles permettent également de calculer la distribution de température de la goutte, qui est de l'ordre de 3000 K [39, 42, 53]. Cependant, si l'effet Marangoni résultant du gradient de température et de composition chimique, donc de tension de surface, est évoqué concernant la goutte [35], aucun résultat quantitatif n'est donné. En ce qui concerne les gouttes de métal traversant le plasma, certains auteurs supposent qu'elles sont traversées par le courant [61] tandis que d'autres considèrent le contraire [36, 58].

Un certain nombre d'articles traitent en particulier de la transition entre les différents régimes de soudage [10, 40, 50, 60, 80]. La modélisation ou l'observation du transfert de métal sont réalisées pour différents courants et gaz de protection. L'interprétation des régimes de fonctionnement est généralement liée à l'attachement de la colonne de plasma sur l'électrode (fil-anode) :

- L'arc est concentré à la base de la goutte en régime globulaire ; les lignes de courant sont alors convergentes et génèrent une force électromagnétique d'attachement expliquant la formation de grosses gouttes.
- En régime de pulvérisation axiale, l'arc entoure complètement l'extrémité de l'électrode et les lignes de courant sont divergentes [18, 31]. La force électromagnétique induite sur la goutte favorise alors son détachement.

Par ailleurs, lorsque la présence de vapeurs métalliques est prise en compte dans le plasma, leur répartition est supposée homogène.

On pourra constater que les différents résultats obtenus au cours de ce travail de thèse, semblent contredire ces dernières observations...

8. LES TRAVAUX REALISES AUX LABORATOIRE

De nombreux résultats ont déjà été obtenus, souvent pour la première fois, au laboratoire, au cours de la thèse de Melle S.Zielinska [1] et d'un précédent travail réalisé dans le cadre d'un stage de Master [114] ; ils couvrent plusieurs des domaines décrits précédemment :

- La mise en place au laboratoire d'une méthode d'observation originale, utilisant une caméra rapide et un filtre interférentiel, avait permis de déterminer la zone du passage du courant dans l'arc hors de toutes observations spectroscopiques. Il avait ainsi pu être mis en évidence :
 - 1/ les différences entre le régime globulaire observé sous protection d'argon pur et sous mélange riche en dioxyde de carbone;
 - 2/ l'existence une corrélation entre la forme de la colonne de plasma et le régime de transfert du métal dans l'arc;
 - 3/ une relation entre la forme 'en cône' caractéristique de la partie centrale de la décharge en régime de pulvérisation axiale et la limite entre les zones d'émission préférentielles des éléments métalliques (au centre) et de l'argon (en périphérie).
- Un premier diagnostic spectroscopique de l'arc de soudage MIG-MAG a été réalisé en appliquant une méthode indépendant de l'état d'équilibre thermodynamique dans plasma. Les résultats obtenus ont mis en évidence la distribution spécifique de la température électronique dans l'arc fonctionnant en régime de pulvérisation axiale, avec l'existence d'un abaissement de la température au centre de la décharge par rapport à la zone périphérique du plasma.
- Enfin, l'analyse microstructurale de l'extrémité du fil anode en fonctionnement sous différents mélanges d'argon et de dioxyde de carbone a permis de montrer l'influence des couches isolantes d'oxydes réfractaires sur le type de transfert du métal dans l'arc.

La couche d'oxyde qui entoure la goutte formée à l'extrémité de l'électrode, est une caractéristique des régimes court-circuit et globulaire. Sous atmosphère d'argon pur et jusqu'à environ 15% de CO₂, l'augmentation du courant permet le passage en régime de pulvérisation axiale avec diminution graduelle de l'épaisseur de la couche oxydée jusqu'à sa disparition complète à la base de la goutte. Au contraire, une addition de dioxyde de carbone dans l'argon provoque une augmentation de l'épaisseur de la couche formée. Par contre, la présence des précipités d'oxydes n'est pas typique des régimes court-circuit ou globulaire, même si leur taux croît pour ces régimes.

Comme pour les précipités, il semble que l'interaction gaz (air ou CO₂) - surface anode soit à l'origine de la formation de la couche d'oxyde, par des procédés d'oxydo-réduction liés au CO₂. Les oxydes formés ont tendance à se concentrer en périphérie de goutte, de même que le laitier en sidérurgie, flotte sur le métal fondu. En régime court-circuit ou globulaire, la quantité d'oxyde est suffisante pour former une couche continue autour de la goutte. En régime intermédiaire, la couche est discontinue, notamment absente à la base de la goutte. L'augmentation de la température (par l'intermédiaire du courant), limite la formation de la couche continue, certainement par augmentation de la solubilité de l'oxygène dans le métal liquide.

Les oxydes métalliques qui se forment dans le matériau de l'électrode (Si, Mn, Fe, Al) appartiennent au groupe des oxydes réfractaires: ils vont former une couche protectrice à la surface du fil-anode, le protégeant d'une oxydation supplémentaire. Cet effet pourrait expliquer l'absence d'oxygène au-dessous de la surface des couches formées lorsqu'elles sont relativement épaisses.

La modification de la composition chimique et de la microstructure d'électrode fusible cause des problèmes de fonctionnement en régime de pulvérisation axiale dans l'arc MAG sous mélange avec une teneur élevée en dioxyde de carbone. La plupart des oxydes sont de bons isolants (par exemple l'alumine Al₂O₃ est utilisée comme l'isolant dans les bougies d'allumage ou comme base de circuit intégré). En conséquence de quoi, sous forte concentration de CO₂ dans le gaz de protection, la couche isolante et réfractaire qui se forme autour de la goutte, va compliquer son détachement et modifier le passage du courant.

Notamment, les modifications provoquées à la surface du métal forcent l'arc à augmenter sa région d'accrochage sur l'anode pour conserver un passage convenable du courant, modifiant par la même occasion la forme de la colonne de plasma.

Une augmentation suffisante du courant d'arc doit alors permettre de vaporiser tout ou partie de cette 'barrière' au bon fonctionnement du procédé, et favoriser le passage en mode de pulvérisation axiale. Ces observations pourraient également expliquer pourquoi, sous forte concentration en dioxyde de carbone dans le gaz de travail, il est extrêmement difficile d'obtenir un régime de fonctionnement stable, sans projections trop importantes, ni formation de grosses gouttes.

IV - ETUDE THEORIQUE

1. INTRODUCTION

Avant de présenter l'étude expérimentale de l'arc de soudage MIG-MAG qui a été réalisée, il convient de définir le cadre théorique dans lequel ces résultats s'inscrivent. Une première partie est dédiée à une rapide présentation des modèles mathématiques des phénomènes étudiés. Une courte description des modèles utilisés pour l'arc est les électrodes est donnée, puis le détachement des gouttes est étudié. Dans une seconde partie les bases théoriques utilisées pour le diagnostic spectroscopique sont données, et la troisième partie est consacrée à l'étude des propriétés métallurgique des matériaux utilisés.

2. MODELISATION

La modélisation de l'arc de soudage constitue un très vaste domaine de recherche comme en témoignent les nombreuses publications présentées précédemment. Les phénomènes électriques complexes aux électrodes nécessitent une étude particulière car ils conditionnent les caractéristiques du passage du courant dans l'arc, et par conséquent le détachement des gouttes et les propriétés du plasma.

2.1. Etude de l'arc

i. Description électrodes.

Dans le cas du soudage MIG-MAG, un arc est établi entre deux électrodes différentes. L'anode est constituée par un fil dévidé en continu tandis que la cathode est constituée par la pièce à souder. De plus la cathode est animée d'un mouvement de translation dans une direction perpendiculaire à l'axe de l'anode. La représentation schématique la plus simple consiste en un modèle pointe-plan, mais pour une description plus précise des phénomènes, il est nécessaire de tenir compte de la géométrie réelle des électrodes : si dans le cas du régime de pulvérisation axiale la configuration est proche d'une pointe, comme dans le cas du soudage TIG, en régime globulaire c'est une section sphérique qui termine l'électrode.

Les deux électrodes présentent par ailleurs des particularités spécifiques liées à leurs polarités. Les phénomènes physiques mis en jeu à ce niveau sont détaillés séparément pour chaque électrode.

ii. Etude de l'anode

Cette partie traite des phénomènes électriques et thermiques ayant lieu à l'anode L'étude du détachement des gouttes est présentée ultérieurement.

La zone anodique est moins complexe que la zone cathodique, car le rôle de l'anode (collection des électrons) est plus passif que celui de la cathode (émission des électrons). Sa fonction principale est d'assurer la continuité électrique, on peut cependant y décrire plusieurs phénomènes :

- La transformation du mouvement désordonné des électrons en mouvement très directif avant leur collection au niveau de l'anode
- L'émission des ions nécessaire pour maintenir le flux ionique dans la colonne d'arc. Dans les conditions du soudage (arc à courant élevé), elle a lieu essentiellement par ionisation thermique sous l'effet des électrons les plus énergétiques
- La transformation du mouvement ordonné des ions produits en mouvement désordonné vers la colonne de plasma.

Comme la mobilité des ions est beaucoup plus faible que celle des électrons, les deux derniers phénomènes sont moins importants que le premier.

En terme de bilan de puissance, on peut distinguer les différentes sources assurant le chauffage de l'anode :

- La conduction thermique des particules fournit une puissance P_{cond} venant du plasma plus chaud,
- La convection fournit une puissance P_{conv} due à l'effet du déplacement du plasma,
- L'apport d'énergie assuré par les électrons P_{elec} lors du transfert d'enthalpie à l'arrivée sur l'anode après avoir gagné de l'énergie dans la gaine,
- L'apport d'énergie par rayonnement P_{rad} qui correspond au bilan entre l'énergie rayonnée par l'anode vers le plasma et celle rayonnée du plasma vers l'anode. Comme le plasma est plus chaud ce bilan est positif, mais il est extrêmement difficile à évaluer car il dépend des propriétés du plasma à ce niveau, lui-même influencé par les vapeurs métalliques issues de l'électrodes (abaissement de la température et augmentation du rayonnement).

La puissance apportée à l'anode peut donc s'écrire :

$$P_a \approx P_{cond} + P_{conv} + P_{elec} + P_{rad} \quad (1.)$$

La perte d'énergie est principalement causée par un terme P'_{cond} de conduction vers le haut de l'électrode, plus froide.

iii. Etude de la cathode

La cathode possède une géométrie nettement différente de l'anode puisqu'elle est constituée par la pièce à souder. De plus c'est la source des électrons émis dans le plasma.

Plusieurs phénomènes peuvent être évoqués :

- L'émission thermoïonique qui a lieu lorsqu'une surface plane est chauffée à une température T : la densité de courant émise est donnée par la relation de Richardson-Dushman

$$J(T, \phi) = \frac{4\pi k_B e m_e}{h^3} T^2 e^{-\frac{(\phi - \Delta\phi)}{k_B T}} \equiv A T^2 e^{-\frac{(\phi - \Delta\phi)}{k_B T}} \quad (2.)$$

Le coefficient A vaut $60 \text{ A.cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$, ϕ est le travail de sortie du matériau et $\Delta\phi$ est lié à la présence éventuelles de charges positives face à la surface émettrice ou d'un champ électrique E facilitant la sortie des électrons. On utilise couramment la valeur de correction déterminée par Schottky :

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi \epsilon_0}} \quad (3.)$$

Ce mode d'émission nécessite des cathodes à point d'ébullition élevé (réfractaire : graphite...) : on parle de cathode chaude. L'attachement de la colonne d'arc sur la cathode se fait alors de façon à travers une zone « diffuse », sans existence évidente d'une ou plusieurs tache cathodique, avec des densités de courant de 10^3 - 10^4 A.cm^{-2} , au moins un ordre de grandeur plus importante que dans la colonne de plasma. Le pied d'arc est alors plutôt stationnaire, ou se déplace lentement sur la cathode. Les valeurs d'émission thermoïonique de différents matériaux sont données sur la Figure IV.1.

- L'émission par effet de champs se produit lorsqu'un champ électrique élevé ($>10^7 \text{ V/cm}$) est appliqué sur une surface métallique : la barrière de potentiel est réduite et l'émission a lieu par effet tunnel. Ce phénomène est généralement prédominant pour les matériaux à bas point de fusion: on parle alors de cathode froide. L'attachement de la colonne d'arc sur l'électrode se fait alors à travers plusieurs taches cathodiques bien visibles induisant une forte constriction de la colonne, avec des densités de courant pouvant atteindre 10^6 - 10^8 A.cm^{-2} . Ces taches cathodiques sont d'autant plus rapprochées que la pression augmente, et leur nombre augmente avec le courant laissant supposer que la densité de courant par site émissif reste quasiment constante. Le comportement du pied d'arc, qui est alors très mobile, est directement lié à l'état de surface de la cathode (couche d'oxyde, impuretés, imperfection mécaniques...).

Pour de faibles valeurs de température on écrit la relation de Fowler-Nordheim donnant la densité de courant émise sous la forme :

$$J(T,E,\phi) = \frac{e^2 E^2}{8\pi h \phi} \exp\left[-\frac{4\sqrt{2m_e} 3\phi}{3 H e E}\right] \quad (4.)$$

En réalité, cette expression ne donne pas de bons résultats pour des faibles valeurs de températures associées à des champs élevés, ce qui remet en question sa validité dans le cas de l'émission par des points microscopiques où le champ appliqué va être multiplié localement par un facteur compris entre 1 et 1000.

- Compte-tenu des propriétés des arcs électriques, où les phénomènes thermiques sont généralement prépondérants et les champs aux électrodes ne sont jamais négligeables, l'émission des électrons ne peut être attribuée à un seul des mécanismes précédents sans pour autant que la densité obtenue soit la simple addition des deux phénomènes précédents. Divers auteurs proposent d'utiliser des relations intermédiaires, la plus achevée étant certainement celle de Murphy et Good [115] basée sur des hypothèses plutôt réalistes sans rien présager a priori sur le mode d'émission, et qui donnent des résultats généralement en bon accord avec l'expérience.

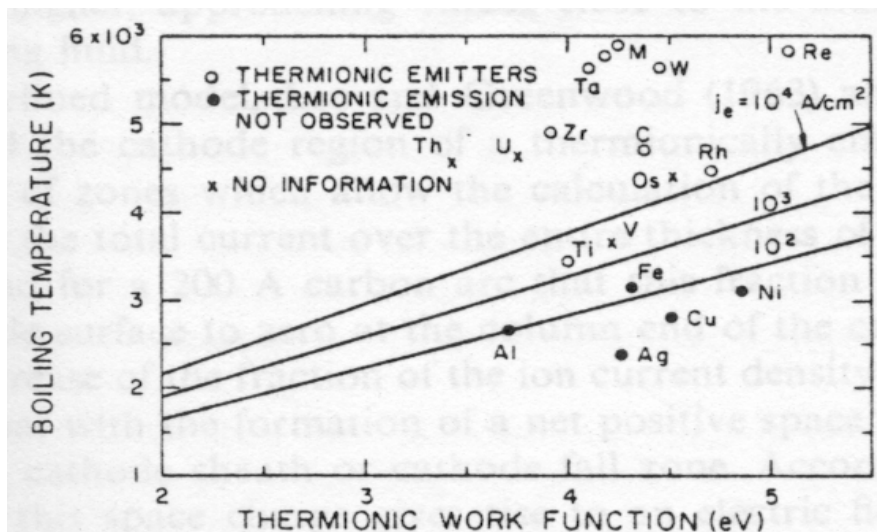


Figure IV.1 : Classification des matériaux selon leur émissivité thermoïonique [116]
[Cas d'un fonctionnement sous argon à pression atmosphérique]

D'autres mécanismes d'émission peuvent également être pris en compte : les électrons peuvent être libérés de la cathode par les composants du champ individuel dues aux variations de la charge d'espace, par effet Auger, par effet photoélectrique externe, par des atomes excités (métastables), par des couches d'oxydes chargées positivement à la surface de la cathode, par abaissement du travail de sortie lié à la présence de couches monoatomiques (W, Th...), ou par charge d'espace négative dans la cathode. Les propriétés des cathodes chaudes et froides sont présentées sur le Tableau IV.1

Cathode	Température de Surface	Densité de courant	Pression	Mode d'attachement
Chaude (thermoïonique)	> 3500K	$10^3-10^4 \text{ A.cm}^{-2}$	≈ ambiante	Fixe, ou lentement variable
Froide (Emission de champ)	< 3500K	$10^6-10^8 \text{ A.cm}^{-2}$	> ambiante	Rapidement variable

Tableau IV.1 : Propriétés des cathodes thermoïoniques ou à émission de champ

La cathode peut également influencer le comportement de toute la colonne de plasma, notamment au travers notamment des jets cathodiques (de vapeur ou de plasma) qui peuvent avoir diverses origines : jets induits par les forces électromagnétiques, vaporisation du matériau constitutif de la cathode ou des impuretés, réaction chimiques en surface dues au gaz plasmagène oxydation...), ou ablation et expulsion de matériau de cathode.

Enfin, il est possible de quantifier l'énergie moyenne ε des électrons émis par une surface métallique soumise à un champ électrique E , ce qui renseigne sur le bilan énergétique des électrons : si ε est différente de l'énergie de remplacement des électrons dans le métal, la différence va intervenir dans les échanges d'énergie de la zone cathodique. L'effet Nottingham est directement lié à cette observation :

- On montre que l'énergie ε des électrons émis par effet de champ est au-dessous du niveau de Fermi : l'émission va se traduire par un réchauffement de la cathode ;
- Au contraire, l'énergie des électrons émis par effet thermique est au-dessus du niveau de Fermi : l'émission va se traduire par un refroidissement de la cathode ;

En terme de bilan de puissance, on peut écrire sous la forme suivante la relation traduisant les différents flux :

$$P_i = P_{ee} + P_{ray} + P_{Jc} + P_{vap} \quad (5.)$$

- La puissance P_i est celle résultant de l'impact des ions. Elle est égale à :

$$P_i = (1-\alpha) \cdot (V_c + V_i + V_\phi) \cdot I \quad (6.)$$

avec α la fraction de courant électronique, V_c la chute de potentiel cathodique, V_i le potentiel d'ionisation des ions considérés, V_ϕ le potentiel électrique associé au travail de sortie de la cathode et I le courant.

La densité surfacique de puissance associée à P_i s'écrit :

$$Q_i = (1-\alpha) \cdot (V_c + V_i + V_\phi) \cdot J \quad (7.)$$

avec J la densité de courant totale dans le pied cathodique.

Les espèces neutres interagissent également en terme d'énergie cinétique lors de contacts avec l'électrode.

- Les électrons (émis ou rétro-diffusés) sont responsables d'un flux sortant d'énergie de puissance P_{ee} et de densité surfacique de puissance Q_{ee} :

$$P_{ee} = V_N \cdot I_e \quad \text{et} \quad Q_{ee} = V_N \cdot J_e \quad (8.)$$

I_e et J_e correspondent respectivement au courant et à la densité électronique émis et V_N est le potentiel, dit de Nottingham, correspondant à la valeur moyenne de l'énergie nécessaire à l'émission d'un électron.

La puissance transférée P_{ray} est définie de la même manière que pour l'anode : elle représente la différence entre la puissance rayonnée par la cathode et celle venant de la décharge

- Le terme P_{Jc} correspond au chauffage par effet Joule et aux pertes par conduction thermique dans la masse de la cathode.
- Enfin, le terme P_{vap} correspond aux pertes d'énergie liées à l'éjection de matière hors de la cathode.
- Pour compléter l'étude des phénomènes se produisant aux électrodes, on peut encore prendre en compte les éventuelles réactions chimiques (oxydations...) se produisant à leur surface.

iv. Description de l'arc.

Les équations sont données dans un repère cylindrique de symétrie axiale (r, z, θ). L'arc électrique est gouverné par les équations suivantes :

- La continuité du potentiel électrique :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (9.)$$

- La densité de courant :

$$\text{Selon } r : \quad J_r = -\sigma \frac{\partial V}{\partial r} \quad (10.)$$

$$\text{Selon } z : \quad J_z = -\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \quad (11.)$$

- Le champ magnétique auto-induit est donné par la relation :

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (12.)$$

On en déduit les composantes axiales et radiales de la force de Lorentz, respectivement :

$$F_r = -B_\theta J_z \quad \text{et} \quad F_z = B_\theta J_r . \quad (13.)$$

- On définit enfin l'équation de l'énergie :

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma} + \frac{5 k_B}{2 e} \left(J_z \frac{\partial T}{\partial z} + J_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - S_R \quad (14.)$$

2.2. Le détachement des gouttes

Le détachement des gouttes peut être étudié selon deux approches : la théorie de l'équilibre des forces statiques (SFBT) et celle de l'instabilité du pincement. Il est gouverné par l'action simultanée de plusieurs forces :

- La force de gravité est une force de détachement dans le cas du soudage à plat (avec la torche au-dessus de la pièce à souder). Son intensité dépend de la masse, donc de la taille des gouttes. Cette dernière est mesurée au chapitre VI, les résultats montrent que la force de gravité est faible.
- La force due à l'effet de traînée du plasma dont la vitesse d'écoulement au niveau de la goutte est fonction de la vitesse du gaz de protection, donc du débit. Elle tend à accélérer les gouttes détachées.
- La force magnétique résultant du passage du courant électrique constitue la principale cause du détachement des gouttes.
- La force due à la tension de surface constitue le principal effet s'opposant au détachement des gouttes.

Les deux dernières forces constituent donc les effets prépondérants à prendre en compte et sont détaillées ci-dessous.

i. L'effet de la tension de surface

Le poids maximal d'une goutte pendante à l'extrémité d'un fil est déterminé par l'équilibre avec la tension de surface. On peut la représenter par un coefficient γ . On appelle r_f le rayon du fil-électrode (dans le cas des essais réalisés, $r_f = 1,2$ mm), r_c le rayon de courbure de la goutte au niveau de l'accrochage sur le fil, et ϕ l'angle formé entre la surface de la goutte et l'horizontal [Cf. Figure IV.2].

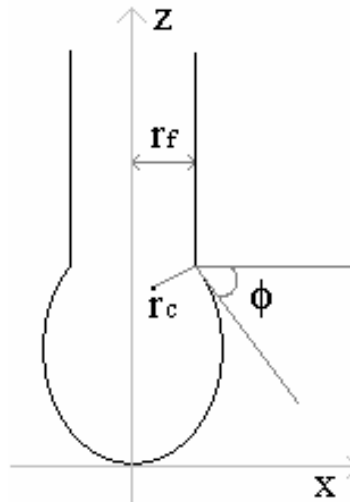


Figure IV.2 : Grandeurs utilisées pour le calcul de l'effet de la tension de surface.

- La force de gravité qui tend à détacher une goutte de volume V , de densité ρ_h vaut :

$$\vec{F}_g = \rho_h V \cdot \vec{g} \quad (15.)$$

où \vec{g} est le vecteur d'accélération de la pesanteur.

- L'excès de pression Δp au niveau de l'extrémité vaut, d'après l'équation de Young-Laplace,

$$\Delta p = \gamma_s \cdot \left(\frac{1}{r_f} + \frac{1}{r_c} \right) \quad (16.)$$

Cet excès de pression engendre une force verticale ascendante de norme :

$$F_p = \pi r_e^2 \cdot \Delta p \quad (17.)$$

- La force exercée par le fluide environnant peut s'écrire

$$\vec{F}_f = \rho_l V \cdot \vec{g} \quad (18.)$$

où ρ_l est la densité du plasma.

- La norme de la composante verticale ascendante de la tension de surface peut s'écrire :

$$F_s = 2\pi r_e \cdot \gamma_s \cdot \sin \phi \quad (19.)$$

L'équilibre des forces s'écrit :

$$\vec{F}_f + \vec{F}_s - \vec{F}_g - \vec{F}_p = \vec{0} \quad (20.)$$

Soit en projetant sur l'axe vertical :

$$\rho_l V \cdot g + 2\pi r_e \cdot \gamma_s \cdot \sin \phi - \rho_h V \cdot g - \pi r_e^2 \cdot \Delta p = 0 \quad (21.)$$

On peut donc définir la norme du poids limite apparent P , correspondant au bilan entre le poids de la goutte et la force exercée par le fluide environnant :

$$P = \gamma_s \cdot \left[2\pi r_f \cdot \sin \phi - \pi \cdot r_c^2 \cdot \left(\frac{1}{r_f} + \frac{1}{r_c} \right) \right] \quad (22.)$$

La relation précédente décrit l'équilibre menant à la définition des caractéristiques géométriques d'une goutte pendant à l'extrémité d'un fil dans un milieu donné, sous l'action du poids, de la tension de surface et du fluide environnant.

La tension superficielle peut être calculée à partir de la mesure du rayon de courbure r_c et de l'angle ϕ , par exemple à partir d'images de la goutte. La valeur dépend, outre de la température, des propriétés du matériau, en particulier de sa composition chimique. Pour le fer pur fondu ($T > 1850$ K), on trouve une valeur de l'ordre de 1800 mN/m [117]. Des valeurs de la force due à la tension de surface seront présentées dans le chapitre VI. Cependant elles n'ont qu'une valeur indicative, car la température et la composition chimique de la surface de l'électrode sont difficiles à évaluer, notamment en raison de la présence d'une couche d'oxydes, ou gangue, dont l'étude sera détaillée au chapitre VII. De la même façon, l'estimation du poids de la goutte présente les mêmes difficultés, puisqu'elle nécessite de connaître la densité du métal qui la compose.

ii. Les forces électromagnétiques

Les forces électromagnétiques agissent sur le plasma et peuvent en modifier la géométrie (constriction). Mais c'est surtout au niveau de la goutte de métal liquide que leur effet, qui ne dépend que de la forme des lignes de courant, est le plus marqué. Par ailleurs, comme tout fluide, ce métal peut éventuellement être animé de différents mouvements (rotation, convection...).

Durant le procédé de soudage, la force électromagnétique de Lorentz joue un rôle décisif dans les mécanismes responsables de la modification du mode de transfert de métal. Cette force de Lorentz est liée à l'interaction de la composante radiale de la densité de courant j_r avec le champ magnétique azimuthal B_θ . En particulier, puisqu'elle est proportionnelle au carré du courant d'arc, cette force devient très importante aux forts courants, mais son signe et son amplitude sont déterminés par la distribution de courant dans la goutte de métal liquide ; d'après [118].

- si les lignes de courant divergent [Cf. Figure IV.3_a], elle aura tendance à détacher la goutte de l'anode ;
- par contre, s'il existe une constriction importante sur l'électrode, cette force aura tendance à maintenir la goutte sur le fil [Cf. Figure IV.3_b].

Les expériences montrent que cette force dépend également de façon importante du type de gaz plasmagène employé. Il n'existe pas actuellement d'explication satisfaisante de cette observation, si ce n'est celle liée à l'influence de la caractéristique tension-courant de la couche anodique qui induit une constriction de la distribution de courant près de l'anode d'autant plus prononcée que la pente de la caractéristique $U-I$ est escarpée [118]. Ainsi, la force de Lorentz est plusieurs fois plus importante lorsque l'argon est employé comme gaz plasmagène (caractéristique $U-I$ de pente faible) par rapport à l'utilisation de l'hélium (pente importante de la caractéristique $U-I$). Dans les gaz moléculaires, l'excitation électronique des degrés de liberté vibrationnelle et rotationnelle rend l'échange énergétique entre des électrons et les molécules très efficaces. Dans ce cas, on peut penser qu'alors la pente de la caractéristique $U-I$ est très importante et donc que l'arc est très pincé à l'anode. Cette conclusion semble d'ailleurs en accord avec les observations de RHEE *et al.* dans le dioxyde de carbone [119].

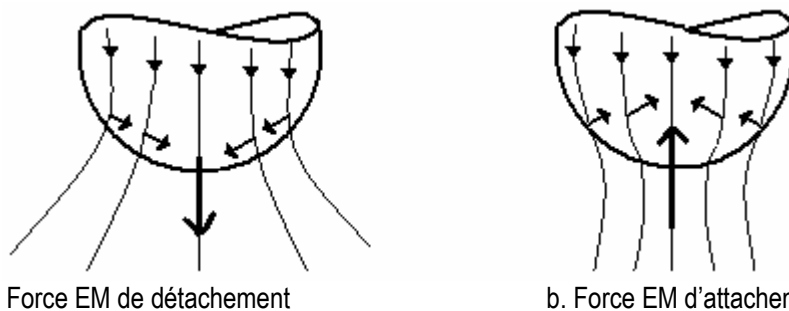


Figure IV.3 : Lignes de courant dans la goutte et dans le plasma adjacent, et forces électromagnétiques résultantes [Les forces électromagnétiques (EM) sont symbolisées par les flèches en gras]

Dans le cadre de l'approximation magnétoquasistatique (MQS) des équations de Maxwell dans un système cartésien on a, les vecteurs étant notés au fil du texte en caractères gras :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_l \quad (23.)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (24.)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (25.)$$

$$\vec{J}_l = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (26.)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (27.)$$

En exprimant \vec{E} à partir de l'équation (26), l'équation (25) donne :

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\sigma} \vec{J}_l \right) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (28.)$$

La densité de courant dans le fluide \vec{J}_f est éliminée de cette équation en combinant les équations (23) et (27), ce qui donne :

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu \sigma} \vec{B} \right) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (29.)$$

Si la conductivité électrique σ et la perméabilité magnétique μ sont supposées constantes dans le matériau, on a :

$$\frac{1}{\mu \sigma} \vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (30.)$$

En utilisant les variables sans dimension (\underline{t} , \underline{v} , \underline{x} , \underline{y} , \underline{z}) définies par :

$$t = \underline{t} \tau, \quad \underline{v} = \underline{v} u, \quad (x, y, z) = (\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}) l \quad (31.)$$

où τ , u et l sont les constantes caractéristiques respectivement de temps, vitesse et longueur, on obtient :

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{\tau_m}{\tau} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - R_m \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (32.)$$

La constante de temps τ_m , qui correspond au temps de diffusion magnétique, vaut

$$\tau_m = \mu \sigma l^2. \quad (33.)$$

et le nombre de Reynolds magnétique vaut

$$R_m = \mu \sigma u l \quad (34.)$$

- La longueur l correspond au diamètre de l'électrode, soit $l = 1,2 \cdot 10^{-3}$ m.

- La vitesse u peut être, en première approximation, prise égale à celle du fil. Une valeur couramment utilisée pour les essais est $u = 9$ m/mn = $0,15$ m.s⁻¹.

- Pour le temps caractéristique on peut prendre une valeur moyenne de la fréquence de détachement des gouttes de 300 Hz soit $\tau = 3,3 \cdot 10^{-3}$ s.

- Pour l'acier fondu, on a la perméabilité magnétique $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹ et la conductivité électrique $\sigma = 1,4 \cdot 10^{-6}$ Ω⁻¹.m⁻¹.

On a donc $\tau_m = 2,53 \cdot 10^{-6}$ s d'où

$$\tau_m / \tau = 7,6 \cdot 10^{-4} \quad \text{et} \quad R_m = 3,2 \cdot 10^{-4}. \quad (35.)$$

Les termes de droite de l'équation (32) sont donc très faibles. Un très bas nombre de Reynolds signifie notamment que la diffusion magnétique est prépondérante devant la convection du fluide dans la goutte.

On peut donc considérer, pour une perméabilité magnétique μ uniforme,

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} = \vec{0} \quad (36.)$$

Cette relation montre que dans les conditions de soudage étudiées, le champ magnétique n'est pas affecté par la vitesse de l'écoulement du métal liquide constituant la goutte mais que c'est la géométrie des lignes de courant qui en détermine la configuration.

Pour une géométrie déterminée, on considère une densité libre de courant \vec{J}_l , la densité de force vaut :

$$\vec{F} = \vec{J}_l \times \vec{B} \quad (37.)$$

En utilisant la loi d'Ampère (23) et la définition du champ magnétique on a :

$$\vec{F} = \mu_0 (\vec{H} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} - \frac{\mu_0}{2} \vec{\nabla} (\vec{H} \cdot \vec{H}) \quad (38.)$$

La force magnétique vaut, exprimée sous forme tensorielle en utilisant la notation d'Einstein :

$$F_m = \frac{\partial T_{mn}}{\partial x_n} \quad (39.)$$

Le tenseur de contraintes magnétique T_{mn} est une matrice symétrique :

$$T_{mn} = \mu_0 H_n \cdot H_m - \frac{\mu_0}{2} \delta_{nm} \cdot H_k H_k \quad (40.)$$

où δ_{nm} représente le symbole de Kronecker.

La composante f_m de la force totale \vec{f} agissant sur un volume V de la goutte est :

$$f_m = \int_V F_m dV = \int_V \frac{\partial T_{mn}}{\partial x_n} dV \quad (41.)$$

Si les composantes d'un vecteur $\vec{\Gamma}$ sont notées $\Gamma_1 = T_{m1}$, $\Gamma_2 = T_{m2}$, $\Gamma_3 = T_{m3}$, en utilisant le théorème de Green, on a :

$$f_m = \int_V \frac{\partial \Gamma_n}{\partial x_n} dV = \int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{\Gamma}) dV = \oint_S \vec{\Gamma} \cdot \vec{n} d\Sigma = \oint_S \Gamma_{nm} \cdot n_n d\Sigma \quad (42.)$$

où S est la surface de la goutte, entourant le volume V , et n_n est la composante normale à la surface. On obtient finalement pour f_m :

$$f_m = \oint_S T_{nm} n_n d\Sigma \quad (43.)$$

Cette relation permet de connaître la force magnétique totale dans un volume connaissant le champ magnétique le long de la surface. Le terme $T_{nm} \cdot n_n$ est homogène à une pression : il correspond à la composante d'un vecteur de traction $\vec{\tau}$ définis par $\tau_m = T_{nm} \cdot n_n$.

On a donc :

$$f_m = \oint_S \tau_m \cdot da \quad (44.)$$

En considérant un vecteur \vec{n} normal à la surface, pour un champ magnétique \vec{H} défini dans un repère cartésien (x,y,z) où z est la direction du vecteur normal, on a

$$H_z = |\vec{H}| \sin \theta, \quad H_y = 0 \quad \text{et} \quad H_x = |\vec{H}| \cos \theta. \quad (45.)$$

On a donc pour le vecteur de traction :

$$\tau_x = T_{xx} n_z = \frac{1}{2} \mu_0 |\mathbf{H}|^2 \sin 2\theta, \quad (46.)$$

$$\tau_y = 0 \quad (47.)$$

$$\tau_z = T_{zz} n_z = \frac{1}{2} \mu_0 |\mathbf{H}|^2 \cos 2\theta, \quad (48.)$$

Le vecteur $\boldsymbol{\tau}$ est dans le plan formé par \mathbf{n} et \mathbf{H} , \mathbf{H} étant sur la bissectrice de l'angle θ formé entre $\boldsymbol{\tau}$ et \mathbf{n} . Quelle que soit l'orientation de la surface on a donc :

$$|\boldsymbol{\tau}| = \frac{1}{2} \mu_0 |\mathbf{H}|^2 \quad (49.)$$

La connaissance de la surface de la goutte est indispensable pour déterminer l'effet des forces électromagnétiques. Des mesures précises des caractéristiques géométriques ont été réalisées : les résultats en seront présentés dans le chapitre VI. A titre indicatif, les valeurs calculées par L.A.Jones [36] sont de l'ordre de 3 à 7 mN pour un courant de 330 A en pulvérisation axiale et 1 à 2 mN en régime globulaire ; dans ce dernier cas, la force peut être dirigée vers le haut.

3. DIAGNOSTIC DU PLASMA PAR SPECTROSCOPIE OPTIQUE D'EMISSION

L'intensité lumineuse $I(y)$ émise par une section horizontale de la colonne d'arc est enregistrée latéralement sur une matrice CCD de 512×512 pixels (taille active: 19×19 μm , taille effective: 24×24 μm) [Cf. Figure IV.4]. La première dimension de la matrice correspond à la dispersion de la lumière et donne la longueur d'onde. La seconde dimension (selon l'axe vertical) correspond à une projection horizontale de la section conique de la source étudiée, la lumière enregistrée étant intégrée sur toute l'épaisseur de la colonne de plasma.

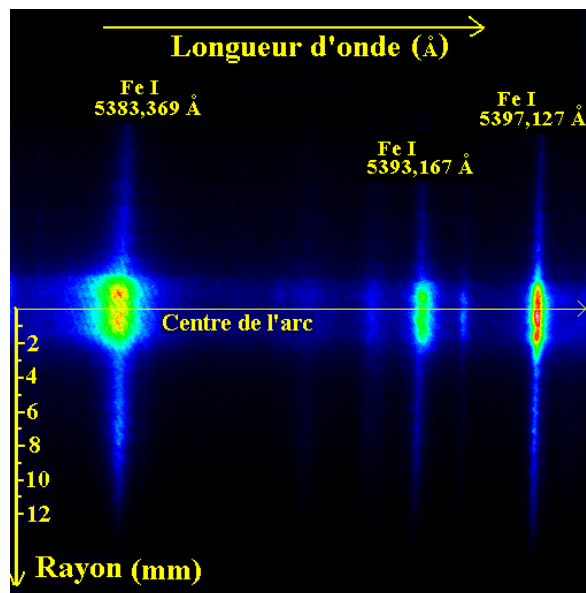


Figure IV.4 : Spectre de l'arc centré à 5389 Å, après correction de l'inclinaison des raies

Pour caractériser complètement la colonne d'arc, il est nécessaire de pouvoir « remonter » à la répartition radiale $I(r)$ de l'émission lumineuse, puis d'ajuster les points expérimentaux à des profils spectraux connus (typiquement des profils de Voigt) afin d'en extraire les paramètres utiles au diagnostic du plasma (intensité, élargissements).

3.1. Calcul de l'émission en fonction du rayon : l'inversion d'Abel

La méthode couramment utilisée pour remonter à la répartition radiale des coefficients d'émission des raies spectrales dans un plasma à partir de l'enregistrement de la répartition transversale du rayonnement émis, est d'utiliser l'inversion d'Abel. Elle est applicable lorsque la source lumineuse est de symétrie cylindrique et que le milieu étudié peut être considéré comme

optiquement mince. Compte tenu des propriétés du plasma étudié et des raies spectrales choisies, la seconde hypothèse est vérifiée. La symétrie de la colonne de plasma est par contre plus délicate à vérifier. Si cette hypothèse est vérifiée pour le haut de la colonne (du côté de l'anode), elle est plus difficile à valider pour le bas de la colonne. L'inversion d'Abel, avec ses imperfections, reste cependant indispensable pour effectuer tout calcul des paramètres de l'arc.

Si on considère une distribution transversale d'intensité $I_\lambda(y)$ à la longueur d'onde λ selon un axe y , la valeur locale du coefficient d'émission en fonction du rayon r , $\varepsilon_\lambda(r)$, est donnée par l'intégrale suivante :

$$\varepsilon_\lambda(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{\frac{dI}{dy}}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (50.)$$

Le schéma correspondant au calcul des données est présenté sur la Figure IV.5. Le calcul est réalisé pour les 512 lignes de mesure (dimension verticale du capteur) correspondant aux différentes valeurs y_i ($i = 1 \dots 512$) prises sur la section considérée de la colonne de plasma, et répété pour les 512 colonnes pour traiter toutes les longueurs d'ondes enregistrées. La résolution spatiale obtenue sur la distribution radiale dépend de l'agrandissement du système optique : elle est typiquement de 0,0625 mm.

Un programme développé au laboratoire, réalisé dans l'environnement LABWINDOWS, permet de calculer ces intégrales de manière automatique, de sorte qu'un spectre peut être traité en quelques minutes. Le calcul est basé sur une méthode d'intégration numérique utilisant un lissage des données par fonctions Splines Cubiques [120] : pour obtenir des valeurs suffisamment régulières, le taux de lissage est en général supérieur à 1%, mais il ne dépasse jamais 5% pour éviter un écart trop important par rapport aux données expérimentales et la perte d'informations.

La détermination du centre de symétrie de l'arc, nécessaire pour réaliser le calcul, est réalisé de façon pseudo-automatique et validée par l'utilisateur. Les données sont alors « symétrisées » en choisissant le côté de l'arc qui sera traité : de façon générale, tous les résultats sont obtenus pour une même moitié d'arc, mais nous avons vérifié qu'ils ne dépendaient que faiblement du choix effectué.

Le programme utilisé permet également de corriger l'inclinaison des spectres inhérente à la configuration même du spectromètre utilisé (fente d'entrée située au-dessous du réseau de diffraction, et miroir sphérique utilisé deux fois) [1], ainsi que la structure interférentielle introduite sur les images enregistrées par la fenêtre d'entrée parallélépipédique du détecteur.

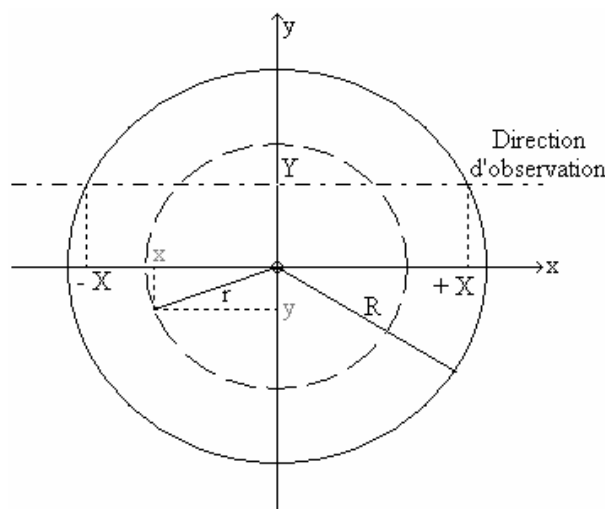


Figure IV.5 : Schéma de calcul de l'inversion d'Abel

3.2. Profil d'une raie

Une raie spectrale émise par un atome ou un ion est théoriquement infiniment mince, mais dans la réalité toute raie présente un certain élargissement. Il dépend des conditions physiques du milieu dans lequel se trouve la particule émettrice [121] et peut avoir plusieurs causes, mais sans aucune influence de l'état d'équilibre du plasma. On distingue notamment :

i. L'élargissement naturel

D'un point de vue classique, on peut considérer l'atome émetteur comme un oscillateur ayant une durée d'émission limitée. Le spectre de Fourier d'une onde de fréquence ν_0 ayant une durée de vie finie $\Delta\tau$ présente une largeur $\Delta\nu$ définie par l'équation :

$$\Delta\tau \cdot \Delta\nu \approx 1 \quad (51.)$$

L'élargissement de la raie émettrice est inversement proportionnel à la durée de vie du niveau émetteur, il suit un profil lorentzien. Cette largeur dite "naturelle" Δw_N , comparable aux pertes dues à l'amortissement d'un oscillateur harmonique, est très faible : elle vaut $\Delta w_N = 2,5 \cdot 10^{-5}$ nm pour la raie du fer I à 5383,369 Å [122], et $\Delta w_N = 9,7 \cdot 10^{-5}$ nm pour la raie d'argon I à 6965,43 Å [123]. Elle sera donc toujours négligeable vis à vis des élargissements mesurés expérimentalement.

ii. L'élargissement Doppler statistique

Lorsque la particule émettrice est animée d'une vitesse de composante V suivant la direction d'observation, la variation relative de longueur d'onde de la raie due à l'effet Doppler (liée à celle de fréquence) est telle que :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V}{c} \quad (52.)$$

où λ_0 est la longueur d'onde émise au repos, $\Delta\lambda$ le glissement de longueur d'onde et c la vitesse de la lumière.

Si la fonction de distribution des vitesses est maxwellienne, pour des atomes émetteurs de masse m à la température T , la vitesse moyenne est égale à :

$$u = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (53.)$$

La superposition des raies émises par le plasma contenant un ensemble d'atomes avec des vecteurs vitesse orientés dans toutes les directions de l'espace avec des modules répartis selon une loi maxwellienne, conduit à un profil Doppler de type gaussien de mi-largeur à $1/e$ $\Delta\lambda_D$:

$$I(\lambda) = I(\lambda_0) \cdot \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta w_D}\right) \quad (54.)$$

avec
$$\Delta w_D = \frac{\lambda_0}{C} \cdot \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (55.)$$

Δw_D est lié à la mi-largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda_D$ de la raie par l'équation :

$$\Delta\lambda_D = \sqrt{\ln 2} \cdot \Delta w_D = \frac{\lambda_0}{C} \cdot \sqrt{\frac{2 \ln 2 kT}{m}} \quad (56.)$$

L'équation (56) s'écrit, en exprimant les longueurs d'onde en nm :

$$\Delta\lambda_D \approx 3.5814 \times 10^{-6} \lambda_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (57.)$$

La masse molaire atomique de l'argon vaut $m = 39,948$ g ; dans ce cas, pour la raie de longueur d'onde 6965,43 Å, l'élargissement Doppler varie de 0,035 Å à 0,100 Å lorsque la

température varie de 2000 K à 16000 K, alors que pour le fer ($m = 55,845$ g) à la longueur d'onde 5383,369 Å, l'élargissement Doppler varie de 0,096 Å à 0,114 Å. Dans les conditions expérimentales rencontrées ($T < 15000$ K), cet élargissement reste faible et pourra être négligé.

iii. L'élargissement collisionnel

L'élargissement collisionnel est dû aux divers processus de collisions élastiques et inélastiques, qui peuvent se produire dans le milieu entre l'atome émetteur et une autre particule (atome, ion, électron). Ceux-ci, en limitant la durée de vie du niveau excité de l'atome rayonnant, conduisent également à un profil de type lorentzien. Deux types d'interactions peuvent être considérés selon la nature des collisions :

- Si les perturbateurs sont des neutres, on parle d'élargissement de pression, pouvant être soit dû à l'effet de résonance lorsqu'il existe des interactions avec échange d'énergie entre deux particules du même émetteur mais dans des niveaux d'excitation différents, soit dû à l'effet Van der Waals lorsque les perturbateurs sont des neutres dans leur état fondamental
- l'effet Stark est dû aux interactions de l'émetteur avec les particules chargées, que ce soit les électrons, ou les particules lourdes ionisées, beaucoup plus lentes. On considère que l'effet Stark prédomine dans les plasmas ayant un degré d'ionisation supérieur à 1%, ce qui est le cas du plasma MIG-MAG.

Dans le cas du plasma étudié, l'élargissement de pression n'est dû qu'à l'effet Van der Waals, et reste de toute façon négligeable devant l'élargissement Stark des raies spectrales considérées [1]. La dispersion d'une raie élargie par les électrons possède un profil de Lorentz de la forme :

$$I(\lambda) = I(\lambda_0) \cdot \frac{\Delta\lambda_s}{(\lambda - \lambda_0 + d_s)^2 + \Delta\lambda_s^2} \quad (58.)$$

où $\Delta\lambda_s$ et d_s sont, respectivement, la mi-largeur à mi-hauteur et le déplacement Stark.

iv. La fonction d'appareil

La nature même des éléments optiques constitutifs du spectromètre (miroirs, réseau) provoque un élargissement de type gaussien de mi-largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda_{app}$ du signal émis, lié à la fonction d'appareil ΔF du dispositif optique. Cette fonction d'appareil dépend des caractéristiques techniques du matériel et de la longueur d'onde λ selon la relation suivante :

$$\Delta\lambda_{app} = \frac{d}{k \times L} \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{k \times \lambda}{2d} \right]^2} \cdot \delta x \quad (59.)$$

où d est le pas du réseau ($d = 1/1200$ mm), L la distance focale du miroir ($L = 2$ m), k l'ordre de travail du spectromètre (typiquement $k = 2$) et δx la distance entre deux points du signal (entre deux pixels du capteurs CCD, $\delta x = 24 \cdot 10^{-3}$ m). Pour plus de précision elle a été mesurée expérimentalement en à l'aide de lampes spectrales basse-pression pour plusieurs longueur d'onde pour obtenir une courbe d'étalonnage.

v. Profil résultant : profil de Voigt

Les différentes causes d'élargissement entraînent soit un profil gaussien (fonction d'appareil, élargissement Doppler), soit un profil Lorentzien (élargissement Stark ou de Van den Waals, élargissement naturel). Le profil résultant correspond à la convolution des différents profils, soit la convolution :

- D'un profil gaussien de mi-largeur à mi-hauteur [124],

$$\Delta\lambda_g = \sqrt{\Delta\lambda_{app}^2 + \Delta\lambda_b^2} \quad (60.)$$

- Par un profil Lorentzien de mi-largeur à mi-hauteur :

$$\Delta\lambda_l = \Delta\lambda_n + \Delta\lambda_s \quad (61.)$$

Le profil résultant est un profil de Voigt de mi-largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda_v$. Compte tenu des rapports entre les différentes causes d'élargissement, la partie lorentzienne $\Delta\lambda_l$ est complètement dominée par l'effet Stark $\Delta\lambda_s$ et la partie gaussienne $\Delta\lambda_g$ se réduit à l'influence de la fonction d'appareil $\Delta\lambda_{app}$.

Entre ces deux types d'élargissement, c'est l'élargissement Stark qui est le plus important, et, en première approximation, il est donc possible d'ajuster les données expérimentales à un profil de Lorentz.

En première approximation il est donc possible d'ajuster les données expérimentales à un profil de Lorentz. Pour une détermination plus précise, un profil de Voigt est nécessaire.

L'équation de la lorentzienne utilisée pour ajuster les données, pour une raie de longueur d'onde centrées sur λ_0 , d'intensité A et de largeur totale à mi-hauteur $\Delta\lambda$, superposées à un fond continu linéaire, est :

$$I_{\lambda}(T) = a_0 + a_1 \lambda + \frac{2A}{\pi \Delta\lambda} \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right)^2} \quad (62.)$$

Pour une détermination plus précise, l'utilisation d'un profil de Voigt serait nécessaire. Néanmoins, nous avons vérifié que, hormis peut-être à la périphérie de la colonne, cela ne modifiait quasiment pas les paramètres Stark de la raie, la partie gaussienne de l'élargissement restant négligeable comparée à la partie lorentzienne.

Le programme utilisé permet, à la suite de l'inversion d'Abel, de réaliser l'approximation des données par un profil de Voigt ou de Lorentz et d'en extraire les paramètres utiles au diagnostic (largeur à mi-hauteur, intensité totale de la raie) pour chaque position radiale dans la section observée de la colonne de plasma.

3.3 L'équilibre thermodynamique local

Le plasma formé en soudage MIG, est constitué d'argon, de fer et des autres constituants du fil-anode vaporisés de l'électrode et des gouttes qui traversent le milieu plasmagène. En plus des espèces atomiques et moléculaires dans l'état fondamental, il comprend de nombreux états excités, mais également des éléments ionisés, qui lui confèrent sa réactivité. En soudage MAG sous mélange Ar-CO₂, il faut également tenir compte du dioxyde de carbone et éventuellement de ses éléments de décomposition.

La modélisation numérique des plasmas de soudage, développée par exemple par Haidar [51 à 56], mais également la majorité es travaux expérimentaux publiés jusqu'à ce jour [par exemple, 61, 72, 88, 90]., sont basés sur l'hypothèse que l'équilibre thermodynamique local est établi dans le plasma. Cette hypothèse est réalisée dans les plasmas thermiques pour lesquels l'excitation des électrons est égale à l'excitation des particules lourdes (neutres, ions), ce qui permet de décrire le plasma par un modèle à une seule température T ($T = T_e = T_h$).

La composition macroscopique du plasma peut être calculée en résolvant les équations couplées suivantes :

- **Electroneutralité**: le plasma est globalement neutre, donc les densités de charges de signe opposé s'annulent..
- **Conservation de l'élément chimique**.
- **Loi de Dalton** sur l'additivité des pressions partielles : la pression totale P du plasma est reliée aux températures T_i de chacune des catégories (i) de particules du milieu et à la température électronique T_e par l'intermédiaire de la densité n_i de ces particules:

$$P = \sum_i N_i k T_i \quad \text{avec } T_i \approx T_e \text{ dans le cadre de l'ETL} \quad (63.)$$

- **Lois de Saha** : elles régissent l'équilibre d'ionisation entre les états d'ionisation successifs d'une espèce (i) donnée:

$$\frac{N_{Z+1,i} N_e}{N_{Z,i}} = 2 \frac{U_{Z+1,i}}{U_{Z,i}} \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{Z,i} - \Delta E_{Z,i}}{k T_e} \right) \quad (64.)$$

où m_e est la masse de l'électron, h la constante de Planck et k la constante de Boltzmann ; $N_{Z,i}$ est la densité totale de l'ion Z fois chargé de l'espèce (i) considérée ; $U_{Z,i}$ et $E_{Z,i}$ sont, respectivement, la fonction de partition et le potentiel d'ionisation de cet ion et $\Delta E_{Z,i}$ est l'abaissement du potentiel d'ionisation de l'ion dû à la présence du champ électrique. Dans la théorie de Griem, applicable aux plasmas relativement denses ($N_e \leq 10^{23} \text{ m}^{-3}$) en ETL., on a :

$$\Delta E_{Z,i} \approx 1,305 \times 10^8 \cdot Z \cdot \sqrt{\frac{N_e e^2 + \sum_i N_i q_i^2}{T}} \quad (65.)$$

- **Lois de Guldberg et Waage** : cas particulier de la relation de Saha, elles définissent l'équilibre de dissociation des espèces moléculaires.
- **Loi de Boltzmann** : elle donne le rapport des populations $N_{Z,i,h}$ et $N_{Z,i,b}$ de deux niveaux h et b d'une particule (i) dans un état d'ionisation Z donné, de poids statistiques respectifs $g_{Z,i,h}$ et $g_{Z,i,b}$ et dont les énergie d'excitation sont respectivement $E_{Z,i,h}$ et $E_{Z,i,b}$:

$$N_{Z,i,h} = N_{Z,i,b} \frac{g_{Z,i,h}}{g_{Z,i,b}} \exp\left(-\frac{E_{Z,i,h} - E_{Z,i,b}}{k T_e} \right) = \frac{N_{Z,i}}{U_{Z,i}} g_{Z,i,h} \exp\left(-\frac{E_{Z,i,h}}{k T_e} \right) \quad (66.)$$

Cette dernière relation permet de déterminer le coefficient d'émission ϵ_{hb} d'une raie spectrale de longueur d'onde λ_{hb} et de probabilité de transition A_{hb} , liée à la transition du niveau électronique excité h vers le niveau b.

$$\epsilon_{hb} = \frac{A_{hb} h \cdot c}{4\pi \lambda_{hb}} N_{Z,i,h} \quad (67.)$$

où c est la vitesse de la lumière.

- Les vitesses des particules suivent une distribution maxwellienne.

Si dans le cas du soudage TIG la composition du plasma (argon neutre et ionisé une fois, quelques traces de vapeurs de tungstène) est relativement simple à déterminer en utilisant ce jeu d'équations pour une température et une pression données, cela s'avère beaucoup plus complexe en soudage MIG-MAG, puisque le transfert des gouttes à travers le plasma génère une forte inhomogénéité par enrichissement local du milieu plasmagène en vapeurs métalliques. Dans ces conditions, la validité de l'hypothèse de l'existence de l'ETL n'est plus évidente : par exemple, S.Zielinska a montré qu'il pouvait exister une ionisation supplémentaire des atomes de fer à la périphérie de la colonne de plasma par effet Penning [1]

Pour pouvoir, non seulement valider les modélisations existantes, mais aussi déterminer complètement les caractéristiques du plasma à partir des mesures spectroscopiques, il est donc nécessaire de vérifier avant tout la validité de l'hypothèse d'existence de l'ETL dans laquelle sont faits tous les calculs de conductivités thermiques et électriques, viscosité etc... La méthode retenue est de déterminer et comparer la température par deux méthodes différentes :

- l'une basée sur l'élargissement des raies spectrales et fournissant, sans hypothèse sur l'état d'équilibre du plasma, température et densité électroniques ;
- l'autre mettant à profit les équations de l'équilibre, et notamment celle (66) régissant l'équilibre de Boltzmann entre les niveaux énergétiques, pour déterminer une température d'excitation.

3.4. Diagnostic du plasma

Température et densité électronique dans la colonne d'arc de soudage, sont des paramètres particulièrement importants, non seulement pour la connaissance des processus qui prennent part au procédé de soudage et pour la validation des modèles numériques disponibles dans la littérature, mais également car leur connaissance peut fournir une indication utile sur le transfert de métal puisque au moins la température agit directement sur la vitesse de fusion du fil-électrode.

Différentes méthodes existent pour déterminer la température d'un plasma par spectroscopie optique d'émission. Par exemple, la méthode de Lorenz-Fowler-Milne est basée sur le fait que, dans un plasma homogène en E.T.L., le coefficient d'émission d'une raie donnée $\varepsilon_{\lambda_{ul}}(T)$ [Cf éq 67] passe, à une pression donnée, par un maximum $\varepsilon_{\lambda_{ul}}^0$ pour une température T_n , dite température normale. Lorsqu'une raie présente à la longueur d'onde λ_{ul} un maximum d'émission en dehors de l'axe du plasma, on peut l'identifier à la valeur de $\varepsilon_{\lambda_{ul}}^0$ à la température T_n , et remonter de proche en proche à la répartition radiale de température dans la colonne, sous réserve de connaître la pression partielle de l'élément considéré dans la zone d'étude. Cette méthode n'est donc malheureusement pas applicable dans le cas du plasma de soudage, car la densité d'atomes de fer dans le plasma n'est pas constante, et varie de l'axe (où le plasma estensemencé par le métal issu de l'anode et des gouttes traversant le milieu plasmagène) et la périphérie de la colonne.

i. La méthode de Sola : détermination simultanée de la température et de la densité électronique

a/ Elargissement Stark des raies spectrales

Comme nous l'avons déjà noté (Cf section 3.2), l'effet Stark est la principale cause d'élargissement des raies spectrales dans le plasma étudié.

La perturbation due aux ions, particules lourdes et peu mobiles, peut être décrite par la théorie de Holtsmark (approximation quasi-statique, dans laquelle le champ électrique des ions auquel est soumis l'atome émetteur, reste constant durant toute la durée de l'émission) et celle due aux électrons, beaucoup plus rapides, par la théorie des collisions individuelles (dans laquelle la durée de la collision est très petite par rapport à la durée d'émission du train d'ondes). Dans un plasma, les électrons provoquent un élargissement et non une décomposition de la raie émise ce qui induit un profil asymétrique avec un déplacement vers le rouge.

Cet effet Stark est inversement proportionnel au numéro atomique Z, ce qui explique pourquoi il est particulièrement important pour l'hydrogène (pouvant aller jusqu'à la décomposition de certaines raies en plusieurs composantes Stark).

Dans les plasmas, on doit tenir compte à la fois de l'élargissement par les électrons et par les ions : le champ électrique quasi-statique des ions fait apparaître les composantes Starks "classiques" (décomposition des niveaux d'énergie sous l'effet du champ) élargies ensuite chacune par les collisions électroniques sous la forme d'un profil de dispersion lorentzien.

Les profils seront donc très différents selon qu'il s'agit des raies de l'hydrogène ou non :

- Pour les raies de l'hydrogène, l'effet Stark "classique" des ions est linéaire et donc relativement important. Dans ce cas, le profil des raies est principalement imposé par l'effet Stark des ions ;
- Pour les autres éléments, l'effet du champ électrique des ions est faible (effet Stark quadratique) et l'élargissement des raies est essentiellement dû aux électrons. Dans ce cas, le profil des raies est alors essentiellement un profil de dispersion de type lorentzien.

Griem [125] propose une formule semi-empirique donnant la mi-largeur Stark à mi-hauteur des raies isolées d'atomes lourds:

$$\Delta\lambda_s = 2 \cdot [1 + 1.75 \cdot \alpha \cdot (1 - c_0 \cdot r)] \cdot w \quad (68.)$$

où α – paramètre d'élargissement dû aux ion [proportionnelle à $N_e^{1/4}$]
 w – largeur à mi-hauteur due aux électrons [proportionnelle à N_e]
 $c_0 = 0.75$ pour un atome neutre et $c_0 = 1.2$ pour un ion
 $r \approx 9 \cdot 10^{-3} N_e^{1/6} / T^{1/2}$

Les paramètres α et w intervenant dans cette équation, on été tabulés par Griem pour nombreuses raies de divers éléments. D'après l'auteur, le domaine de validité de cette équation est donné par

$$0.05 < \alpha < 0.5 \quad \text{et} \quad r < 0.8 \quad (69.)$$

Dans tous les cas, lorsque l'effet Stark prédomine, ce qui est le cas de notre plasma, la partie lorentzienne de l'élargissement des raies est directement liée à la densité électronique et dépend généralement peu de la température électronique. Cet effet ne dépend pas de l'état d'équilibre du plasma ni de sa composition : la mesure de la largeur à mi-hauteur des raies émises par le milieu plasmagène, sous réserve que l'on puisse en distinguer les différentes causes, fournit donc une méthode efficace pour estimer directement la valeur de la densité électronique du plasma et, sous certaines conditions, sa température, sans aucune hypothèse a priori sur son état d'équilibre.

b/ Principe de la méthode de Sola

Sola *et al.* [126], puis Torres *et al.* [127] ont proposé une méthode qui permet d'obtenir simultanément la température et la densité électronique dans le plasma, sans hypothèse sur l'état d'équilibre du plasma. Par contre, cette méthode exige la connaissance de la dépendance de l'élargissement Stark en fonction de la densité électronique et de la température, pour deux raies spectrales bien identifiées.

Nous avons choisi deux raies spectrales bien connues: la raie d'argon à 6965,43 Å, correspondant à la transition 4p'[1/2]-4s[3/2], et la raie du fer e⁵H-z⁵G° à 5383,369 Å. Ces deux raies sont considérablement élargies dans les conditions du plasma de l'arc de soudage, et leur élargissement normalisé à 10²³ m⁻³ dépend de manière très différente de la température:

- **Elargissement Stark pour le raie d'argon 6965.43 Å:** Les travaux de S.Pellerin *et al.* [128] donnent, pour l'élargissement Stark de la raie 6965.43 Å d'ArI

$$\Delta\lambda_s^{Ar} = 0,0814 \cdot \frac{N_e}{10^{23}} \cdot \left(\frac{T_e}{13000} \right)^{0.3685} \quad (70.)$$

où $\Delta\lambda_s^{Ar}$ est exprimé en nm, N_e en m⁻³, et T en K.

Cette expression est valable pour des densités électroniques $N_e < 2 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, la précision du coefficient de proportionnalité étant estimée à 5%.

- **Elargissement Stark pour le raie de fer 5383.369 Å:** Sur la base des résultats expérimentaux de Lesage *et al.* [129 et 130], nous avons déterminé le coefficient de proportionnalité entre l'élargissement Stark de la raie et la densité électronique, en fonction de la température [Cf. Figure IV.6]:

$$\Delta\lambda_s^{Fe} = 0,2648 \cdot \frac{N_e}{10^{23}} \cdot \left(\frac{T_e}{13000} \right)^{1.6700} \quad (71.)$$

où $\Delta\lambda_s^{Fe}$ est exprimé en nm, N_e en m⁻³, et T en K.

On peut admettre que cette formule est valable jusqu'à des températures de l'ordre de 15000 K. Néanmoins, puisqu'il n'y existe pas de données expérimentales pour les températures plus petites que 6600 K, et plus grandes que 14074 K, il conviendra d'interpréter avec précaution l'éventuelle obtention de valeurs de la température électronique extérieures à ce domaine.

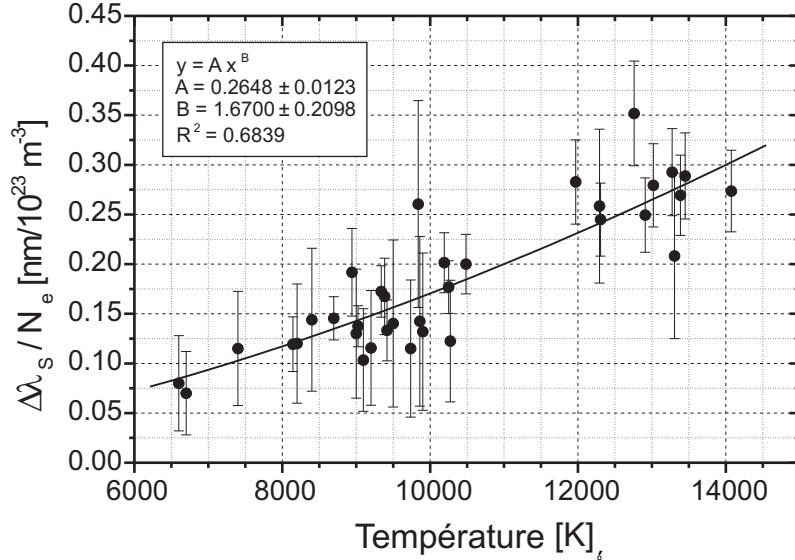


Figure IV.6 : Elargissement Stark normalisé (FWHM) de la raie 5383.376 Å de Fe I en fonction de la température [129, 130]

La courbe correspond à un ajustement des données expérimentales par la fonction puissance $y = A x^B$.

Connaissant les élargissements Stark $\Delta \lambda_s^{Ar}$ et $\Delta \lambda_s^{Fe}$ mesurés pour les deux raies spectrales choisies de Ar I et Fe I, il reste à résoudre un système de deux équations à deux inconnues N_e et T_e :

$$\begin{cases} \Delta \lambda_s^{Ar} = 0,0814 \cdot \frac{N_e}{10^{23}} \cdot \left(\frac{T_e}{13000} \right)^{0.3685} \\ \Delta \lambda_s^{Fe} = 0,2648 \cdot \frac{N_e}{10^{23}} \cdot \left(\frac{T_e}{13000} \right)^{1.6700} \end{cases} \quad (72.)$$

Utilisant ces deux équations, il est aisé de montrer que l'expression de la température en fonction des élargissements Stark relatifs des deux raies s'écrit :

$$T_e = 13000 \cdot \left(\frac{\Delta \lambda_s^{Fe}}{\Delta \lambda_s^{Ar}} \cdot \frac{0,0814}{0,2648} \right)^{0.7683} \quad (73.)$$

On peut ensuite calculer la concentration d'électrons libres, en appliquant une des équations du système d'équations (72).

ii. Méthode des graphes de Boltzmann et Hypothèse d'ETL

Une méthode, basée sur l'équation de l'équilibre de Boltzmann, est fréquemment utilisée pour mesurer la température d'un plasma de soudage. Elle requiert peu de calculs et permet de déterminer la température électronique tout en fournissant des informations sur la validité de l'hypothèse de l'ETL en chaque point du plasma. Cette technique a notamment été utilisée par S.Nowak *et al.* [131] avec des raies d'Ar I et par B.Pokrzywka *et al.* [132] avec des raies d'Ar II et d'Ar III dans un arc électrique.

L'émissivité d'une transition d'un niveau k vers un niveau i s'exprime par la relation suivante [133] :

$$\varepsilon_{ki} = N_k A_{ki} \frac{h \nu_{ki}}{4\pi} = N_k A_{ki} \frac{hc}{4\pi \lambda_{ki}} \quad (74.)$$

avec $N_k = N_k(T_e)$: population du niveau k ; A_{ki} , ν_{ki} , λ_{ki} : probabilité (en s^{-1}), fréquence (en s^{-1}) et longueur d'onde (en m) de la transition $k \rightarrow i$, respectivement.

Dans l'hypothèse où l'équilibre de Boltzmann est réalisé, les populations N_k des différents niveaux sont régies par la loi de Boltzmann [Cf. eq.66] et le coefficient d'émission peut s'écrire :

$$\varepsilon_{ki}(T_e) = K(T_e) A_{ki} \nu_{ki} g_k \exp\left(-\frac{E_k}{kT_e}\right) \quad (75.)$$

où le coefficient $K(T_e)$, qui fait intervenir la fonction de partition $U(T_e)$, et la densité totale des atomes émetteurs $N(T_e)$, ne dépendent que de la température T_e du point du plasma considéré; E_k , g_k sont l'énergie et le poids statistique du niveau supérieur (k) de la transition, respectivement.

L'équation précédente peut encore s'écrire sous la forme

$$y \equiv \ln\left(\frac{\varepsilon_{ki}}{A_{ki} \nu_{ki} g_k}\right) = \ln K - \frac{E_k}{kT_e} \quad (76.)$$

Les paramètres spectroscopiques d'une raie de longueur d'onde λ_{ki} (ou de fréquence ν_{ki}), E_k , g_k et A_{ki} , peuvent être trouvés dans la littérature ou dans la base de données en ligne du NIST, de sorte que le tracé de la droite y en fonction de E_k au point considéré du plasma, dont la pente est inversement proportionnelle à la température, permet de déterminer T_e . La constante K , donnant l'ordonnée à l'origine, est sans effet sur le calcul.

Cette méthode a le grand avantage de permettre une vérification de l'ETL en chaque point du plasma. En effet, si tel est le cas, les points de mesure doivent être parfaitement alignés. Cependant, sa mise en œuvre est rendue difficile par la nécessité de trouver un nombre convenable de raies ayant des probabilités de transition connues avec précision, des niveaux de départ suffisamment espacés en énergie, mais également des longueurs d'onde suffisamment proches pour éviter les problèmes de calibrage en énergie du dispositif d'acquisition.

Expérimentalement, quelques raies de fer atomique ont été choisies en vue de couvrir la plus grande plage possible en énergie afin d'améliorer la précision de la méthode : il s'agit des raies à 4202,028 Å, 4203,938 Å, 4207,127 Å, 4210,343 Å, 4213,648 Å et 4219,360 Å de FeI, dont les caractéristiques sont données dans le Tableau IV.2.

	λ [Å]	Transition	Multiplet	E_k [cm ⁻¹]	g_k	A_{ki} [10 ⁸ s ⁻¹]	Préc.
FeI	4202,028	3d ⁷ 4s-3d ⁷ 4p	a ³ F-z ³ G°	35767,561	9	0,0822	B ⁺
	4203,938	3d ⁶ 4s ² -3d ⁷ 4p	a ¹ I-z ¹ I°	53093,521	13	0,13	C
	4207,127	3d ⁷ 4s-3d ⁶ 4s4p	b ³ P-z ³ S°	46600,814	3	0,043	C
	4210,343	3d ⁶ 4s4p-3d ⁶ 4s5s	z ⁷ D°-e ⁷ D	43763,980	3	0,17	C ⁺
	4213,648	3d ⁷ 4s-3d ⁶ 4s4p	b ³ P-y ³ P°	46672,527	1	0,19	C
	4219,360	3d ⁷ 4s-3d ⁷ 4p	a ¹ H-y ³ I°	52513,549	13	0,38	C ⁺
	5014,941	3d ⁶ 4s4p-3d ⁶ 4s5s	z ³ F°-e ³ D	51739,920	5	0,3	C ⁺
	5383,369	3d⁷4p-3d⁷4d	z⁵G°-e⁵H	53352,98	13	0,56	C⁺
	5393,167	3d⁶4s4p-3d⁶4s5s	z⁵D -e⁵D	44677,004	9	0,031	C⁺
	5397,127	3d⁷4s -3d⁶4s4p	a⁵F-z⁵D	25899,987	9	0,00259	B⁺
FeII	5018,44	3d ⁵ 4s ² -3d ⁶ 4p	a ⁶ S-z ⁶ P°	43238,586	6	0,027	C
ArI	6965,431	4s-4p [°]	[1 ½] [°] -[½]	107496,4166	3	0,0639	C

Tableau IV.2 : Données spectroscopiques des transitions utilisées pour le diagnostic [134, 135, 136, 137, 138, 139, 140]
[Précision: A ≤ 5% ; B ≤ 10% ; C ≤ 25%]

Malheureusement, cette méthode n'est applicable qu'au centre de la colonne de plasma, où les raies de Fe I sont suffisamment intenses, mais où la raie à 4202,028 Å est clairement réabsorbée dès que l'arc fonctionne en mélange Ar-CO₂. Il faut noter qu'il en est de même pour la raie à 4219,360 FeI, de forte probabilité de transition, lorsque le pourcentage de CO₂ dans le gaz de

protection devient important ($\approx 20\%$ vol). Les trois raies du fer généralement utilisées pour les mesures sont la raie à 5383,369 Å, 5393,1677 Å et 5397,127 Å [134] : un relativement bon alignement des points expérimentaux sur la plage d'énergie considérée [$25899 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 53353 \text{ cm}^{-1}$] est une première indication pour considérer notre plasma proche de l'état d'équilibre. Les données spectroscopiques des trois raies ci-dessus sont données en annexe A.

iii. Détermination de la composition du plasma

La connaissance des propriétés du plasma dépend de la proportion de fer dans le milieu plasmagène. La détermination de cette donnée, plus exactement du rapport N_{Fe}/N_{Ar} , n'est pas aisée, et nécessite quelques hypothèses: la première est que le plasma est en équilibre thermodynamique local. Dans ce cas, le coefficient d'émission ε_{nm} d'une raie de longueur d'onde λ_{nm} s'écrit [Cf. Eq. (66) et (67)] :

$$\varepsilon_{nm} = \frac{hc}{4\pi\lambda_{nm}} \cdot g_n \cdot A_{nm} \cdot \frac{N(T)}{U(T)} \cdot \exp\left(\frac{-E_n}{kT}\right) \quad (77.)$$

Appliquant cette équation successivement aux raies d'Ar I et de Fe I, nous pouvons calculer le rapport de concentrations des atomes de fer et d'argon :

$$\frac{N_{Fe}(T)}{N_{Ar}(T)} = \frac{\lambda_{Fe}}{\lambda_{Ar}} \cdot \frac{g_{Ar}}{g_{Fe}} \cdot \frac{A_{Ar}}{A_{Fe}} \cdot \frac{U_{Fe}(T)}{U_{Ar}(T)} \cdot \frac{\varepsilon_{Fe}(T)}{\varepsilon_{Ar}(T)} \cdot \exp\left(\frac{-E_{Ar} - E_{Fe}}{kT}\right) \quad (78.)$$

où

$\lambda_{Fe} = 5383,369 \text{ Å};$	$\lambda_{Ar} = 6965,43 \text{ Å};$
$g_{Fe} = 13;$	$g_{Ar} = 3;$
$A_{Fe} = 0,56 \times 10^8 \text{ s}^{-1};$	$A_{Ar} = 0,0639 \times 10^8 \text{ s}^{-1};$
$E_{Fe} = 6,61492 \text{ eV};$	$E_{Ar} = 13,32786 \text{ eV};$

La fonction de partition $U_i(T)$ d'un élément donné (i) est définie comme la somme des poids statistiques multipliés par le facteur de Boltzmann de tous niveaux (a) de l'atome ou de l'ion considéré.

$$U_i(T) = \sum_a g_{ia} \cdot \exp\left(\frac{-E_{ia}}{kT}\right) \quad (79.)$$

Si pour des températures relativement basses il est possible de se contenter des premiers termes dans l'expression de $U_i(T)$, lorsque la température est plus élevée, cela ne suffit plus. Or lorsque le niveau (a) tend vers la limite d'ionisation de l'espèce considérée, E_{ia} tend vers la limite d'ionisation $E_{i\infty}$ pendant que g_{ia} croît avec le nombre principal du niveau. La sommation infinie qui définit la fonction de partition diverge, à moins de lui trouver une limite physiquement acceptable. Celle-ci s'obtient en remarquant que, dans un plasma de densité élevée, les particules ne sont pas indépendantes. Il existe entre elles une interaction qui induit un abaissement du potentiel d'ionisation ΔE_{∞} . En particulier, pour un plasma une fois ionisé, Griem propose de prendre :

$$\Delta E_{\infty} \cong 2,953 \cdot 10^{-11} \cdot \sqrt{\frac{N_e}{T}} \quad (80.)$$

Dans nos conditions expérimentales, cet abaissement du potentiel d'ionisation est proche de $\Delta E_{\infty} \approx 0,1 \text{ eV}$, que ce soit dans l'argon pur ou dans un mélange avec 20% vol de dioxyde de carbone.

Halenka *et al.* [141, 142] ont calculé la fonction de partition du fer atomique Fe I et du fer ionisé Fe II: par commodité, leurs résultats, présentés sur la Figure IV.7, ont été ajustés à un polynôme de degré 4.

Pour l'argon atomique, la fonction de partition peut-être prise égale à 1 lorsque la température est inférieure à 15000 K [143].

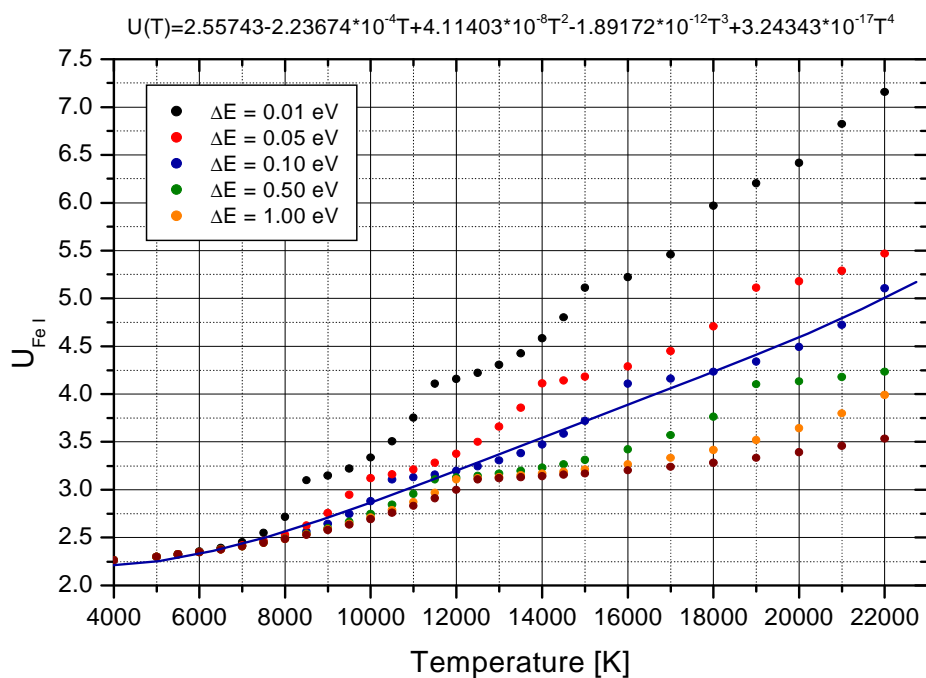


Figure IV.7 : Fonction de partition du fer atomique FeI [141, 142]

4. INFLUENCE DU DIOXYDE DE CARBONE ET DES VAPEURS DE FER SUR LES PROPRIETES D'UN PLASMA D'ARGON EN ETL

T&TWINNER est un logiciel de calcul thermochimique destiné au plus grand nombre: chercheurs, enseignants, étudiants... Il est d'une base de données qui récapitule de 2000 à 6000 espèces chimiques en phases gazeuses, liquides ou solides. Ces données sont accessibles à l'utilisateur: celui-ci constitue un système initial de son choix dont il peut suivre l'état d'équilibre chimique final en fonction de la température ou de la pression.

Le moteur de calculs de T&TWINNER évalue

- **la composition à l'équilibre thermodynamique** par minimisation de l'énergie libre de Gibbs: Soit M éléments (au sens chimique répertoriés dans le tableau périodique, susceptibles de se combiner en N espèces chimiques); l'équilibre thermodynamique du système est atteint, **à pression et température constantes**, pour la composition molaire $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ pour laquelle l'enthalpie libre ou potentiel de Gibbs $G(X)$ est minimum. Cette enthalpie libre $G(X)$ est la somme des enthalpies libres de chacun des constituants.
- **les propriétés thermodynamiques** par minimisation de l'enthalpie libre par la méthode des multiplicateurs de Lagrange et l'algorithme de la plus grande pente de White et Dantzig. Il permet l'évaluation de systèmes extrêmement complexes. Les multiplicateurs de Lagrange peuvent être identifiés à des potentiels chimiques élémentaires, en conséquence la précision relative sur le nombre de moles des espèces minoritaires est identique à celle des espèces majoritaires si les données de bases sont connues.
- **les propriétés de transport** évaluées selon la théorie de Chapman-Enskog dans l'approche de Devoto. C'est-à-dire : espèces lourdes représentées par des polynômes orthogonaux limités au second terme et électrons polynômes représentés par des polynôme limité au troisième terme. La conductivité thermique réactionnelle évaluée selon la méthode de Butler et Brokhaw étendue par Aubreton et Bonnefoi aux systèmes à deux températures.

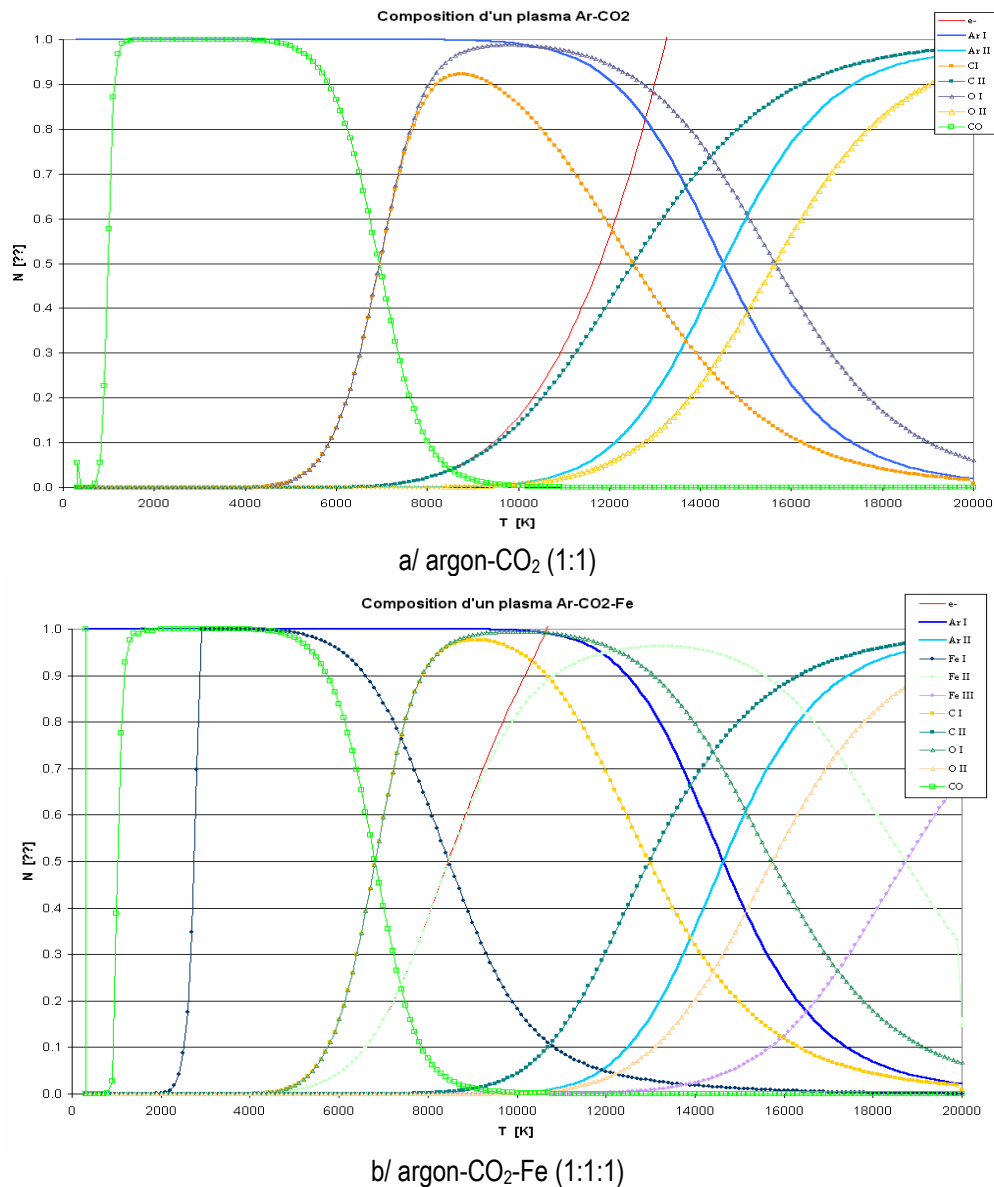


Figure IV.8 : Composition d'un plasma de mélange à l'ETL en fonction de la température

Le calcul des autres propriétés thermodynamiques est fondé sur la recherche de la composition qui minimise l'enthalpie libre $G(T,P)$ du système chimique qui inclut phases gazeuse, liquides et solides : Ainsi, les évaluations de l'enthalpie $H(T,P)$, de l'énergie interne $E(T,V)$ et de l'entropie $S(T,P)$ du système sont immédiates; ensuite, par dérivation numérique sont obtenus :

$$C_p = dH/dT \quad C_v = dE/dT \quad g = C_p/C_v \quad G = (dH/dE)_S \quad (81.)$$

ainsi que la célérité du son a avec

$$a^2 = GnRT/M \quad (82.)$$

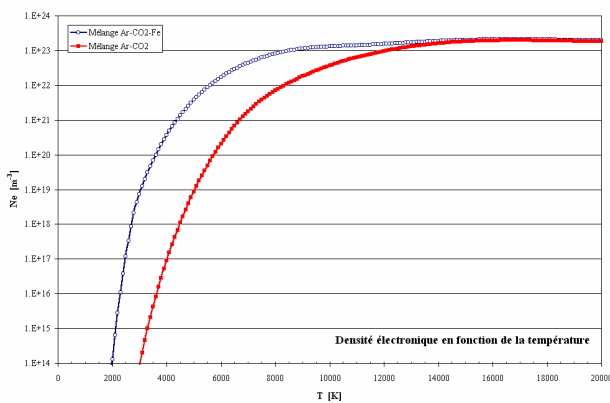
où : n nombre de moles, M masse molaire, T température, P pression, V volume, R constante des gaz parfaits, C_p chaleur spécifique à pression constante, C_v chaleur spécifique à volume constant, G coefficient isentropique.

Les calculs peuvent être effectués dans des conditions

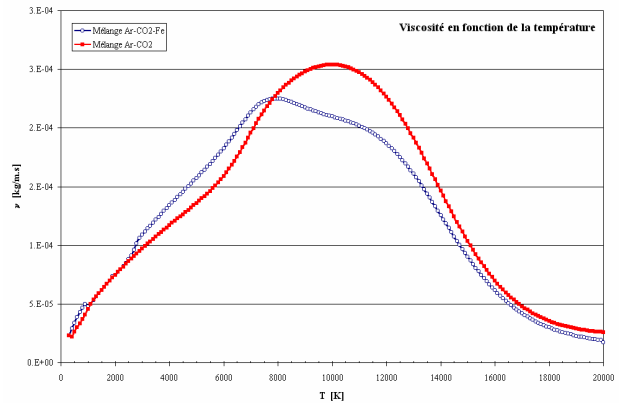
- isothermes (température constante) ou adiabatiques (sans échange de chaleur, ici enthalpie ou énergie interne constante),
- isobares (pression constante) ou isochores (volume constant).

La véritable difficulté de ce type de calcul est de connaître les données primaires ! Ainsi, les données thermodynamiques sont connues de façon quasi-exhaustive pour la température $T < 2000$ K (bases de données de Gurvich, Janaf, Barin, LMCTS, etc...). Mais pour les données de calcul des propriétés de transport les potentiels d'interaction sont incertains. Néanmoins, en ce qui concerne les hautes températures ($T > 2000$ K) la plupart des gaz usuels sont répertoriés dans la base ADEP, de même qu'un certain nombre de composés en phase gazeuse, liquide ou solide (plus de 1000).

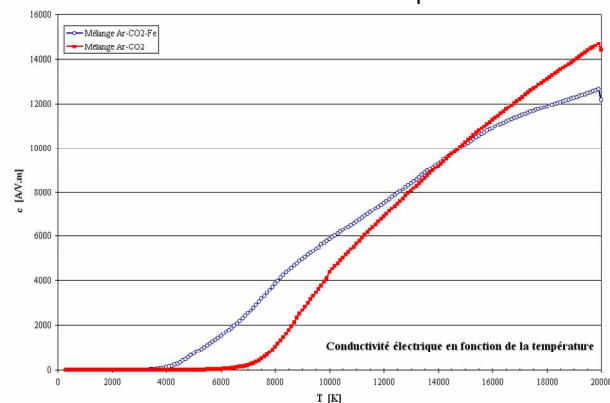
M.PATEYRON, de Limoges, nous a fourni les résultats du calcul de composition et les propriétés thermodynamiques d'un plasma de mélange Ar-CO₂ et Ar-CO₂-Fe dans les proportions respectives 1:1 et 1:1:1 [Cf. Figure IV.9 et Figure IV.15]. Il est peu probable que la proportion de fer dans les plasmas de soudage soit aussi élevée, mais cela donne tout de même une bonne idée de son influence sur les propriétés du plasma.



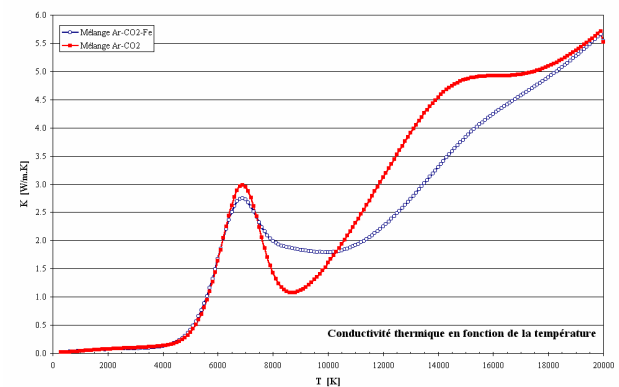
a/ Densité électronique



b/ Viscosité



c/ Conductivité électrique



d/ Conductivité thermique

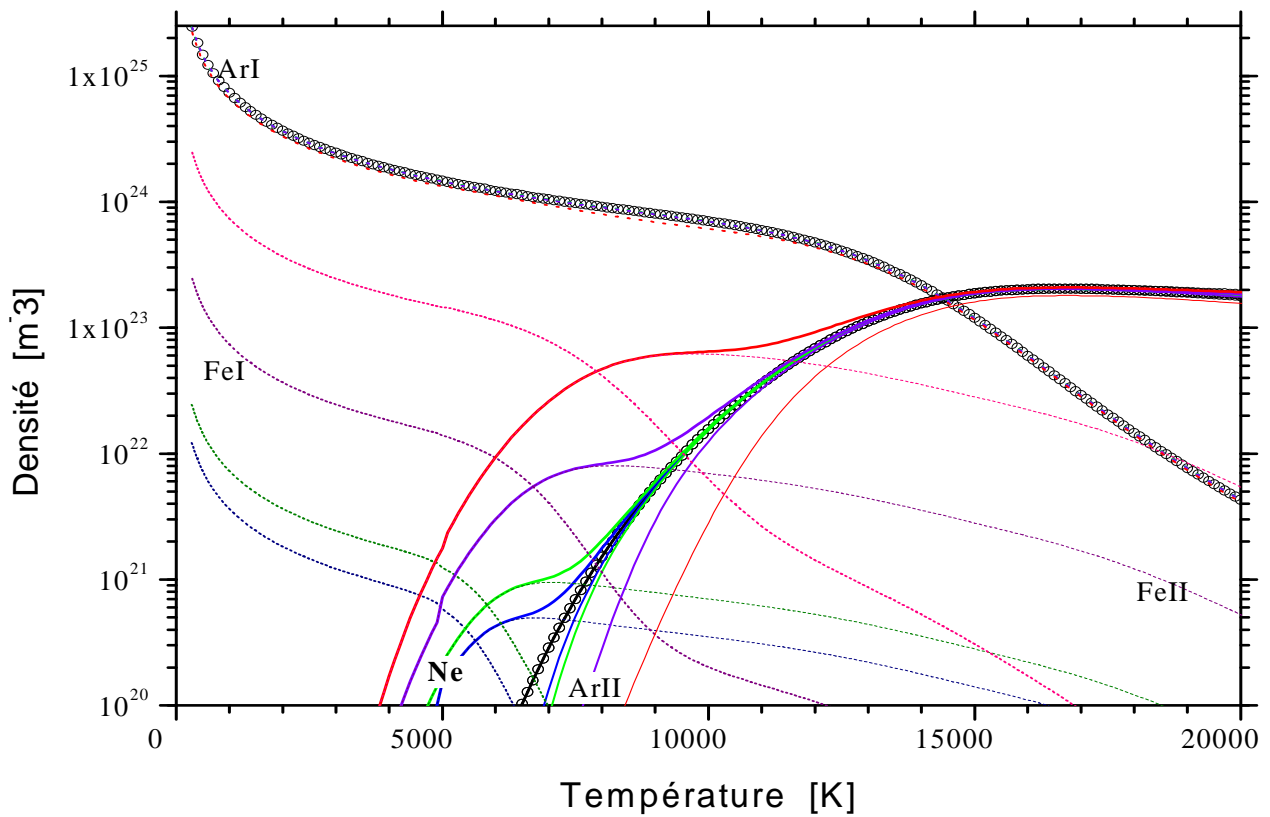
Figure IV.9 : Propriétés d'un plasma de mélange à l'ETL en fonction de la température

T.Murphy, du CSIRO (Australie), a accepté de calculer la composition et les propriétés thermodynamiques d'un plasma Ar-CO₂-Fe dans une large gamme de compositions. La méthode utilisée et les données de section efficace pour l'argon, sont tirées de A.B.MURPHY *et al.* [144]. Il faut noter que, pour les calculs de fractions molaires et de densités, deux jeux de données sont utilisés, selon que la température est supérieure ou inférieure à 5000 K.

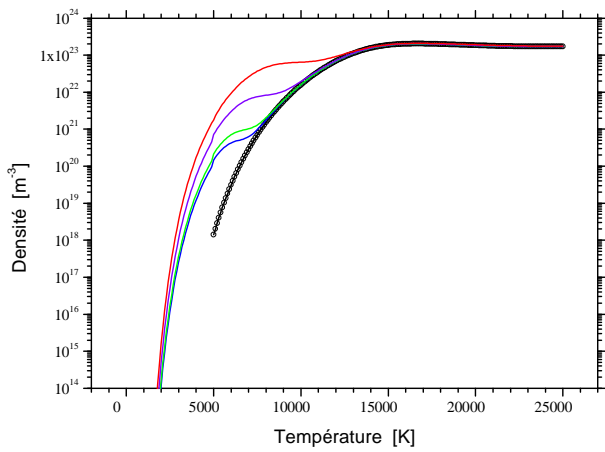
Les résultats fournis par T.Murphy sont présentés Figure IV.13 et Figure IV.14 (dans lesquelles, pour des questions de lisibilité, n'ont pas été incluses les contributions des FeIII et ArIII (par ailleurs très faibles en-dessous de 18000 K) : ils concernent des plasmas de mélanges Ar-Fe dans les proportions molaires 100%-0%, 99,95%-0,05%, 99,90%-0,10%, 99,00%-1,00% et 90%-10% (soit 100%-0%, 99,93%-0,07%, 99,86%-0,14%, 98,60%-1,39%, 86,55%-13,44% en masse, respectivement).

Les résultats obtenus dans divers mélanges Ar-CO₂ avec des proportions variables de Fer, sont donnés dans la Figure IV.14_a..d. En particulier, les Figure IV.12 et Figure IV.13 montrent l'influence du taux de CO₂ sur les caractéristiques de transport du plasma. Ainsi :

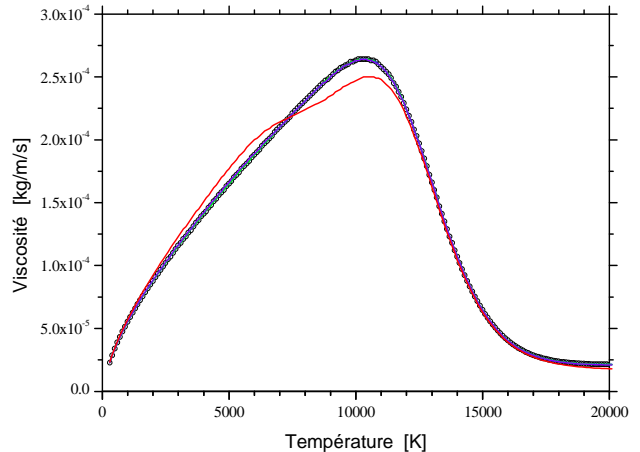
- Pour des températures inférieures à 10000 K, la densité électronique et la conductivité électrique sont clairement influencées par la présence de Fe dans le milieu plasmagène. Au contraire, l'apport de CO₂ contrebalance l'effet des vapeurs métalliques en rigidifiant le plasma lorsque sa température est approximativement dans la gamme 5000 K – 8000 K.
- L'influence des impuretés métalliques sur la conductivité thermique et la viscosité dans le plasma, est beaucoup plus réduite : elle n'apparaît que pour des proportions de Fe supérieures à 10% molaire à haute température (> 10000 K), bien au-dessus des quantité attendues dans la colonne de plasma.
- La dissociation, l'ionisation et les réactions chimiques augmentent le transfert de chaleur dans plasma. En particulier, l'addition de dioxyde de carbone (gaz à caractère oxydant et chimiquement actif) augmente la conductivité thermique du plasma.



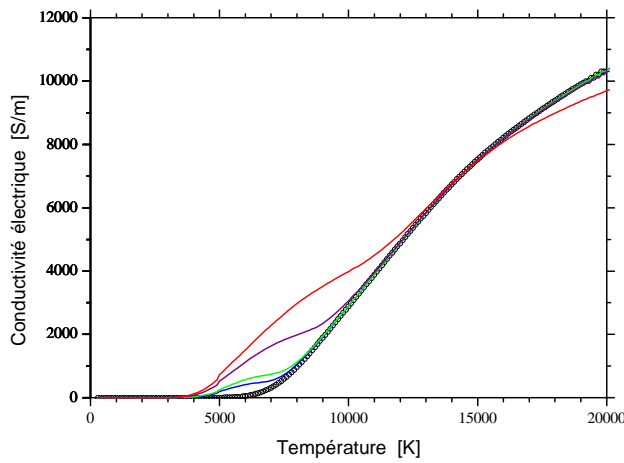
◆ argon pur (ArII = Ne); ◆ 99,95% Ar; ◆ 99,90% Ar; ◆ 99,00% Ar; ◆ 90,00% Ar, ○ ArI; — ArII ; II Ne; ... FeI, FeII
 Figure IV.10 : Composition de plasmas de mélange Ar-Fe à l'ETL en fonction de T



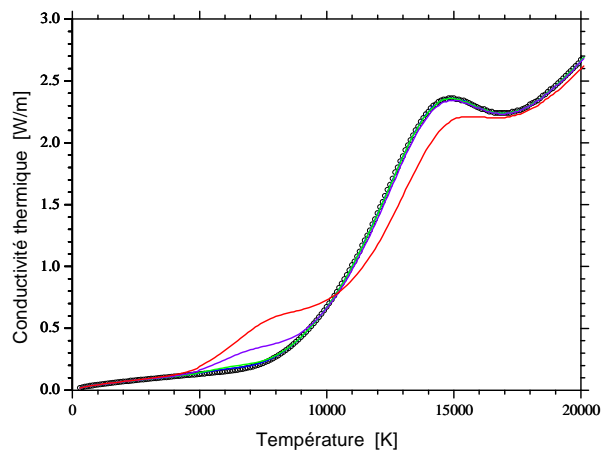
a/ Densité électronique



b/ Viscosité



c/ Conductivité électrique



d/ Conductivité thermique

◆ argon pur (ArII = Ne); ◆ 99,95% Ar; ◆ 99,90% Ar; ◆ 99,00% Ar; ◆ 90,00% Ar; ○ ArI; — ArII; II Ne; ... Fel, FeII
 Figure IV.11 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-Fe à l'ETL en fonction de T

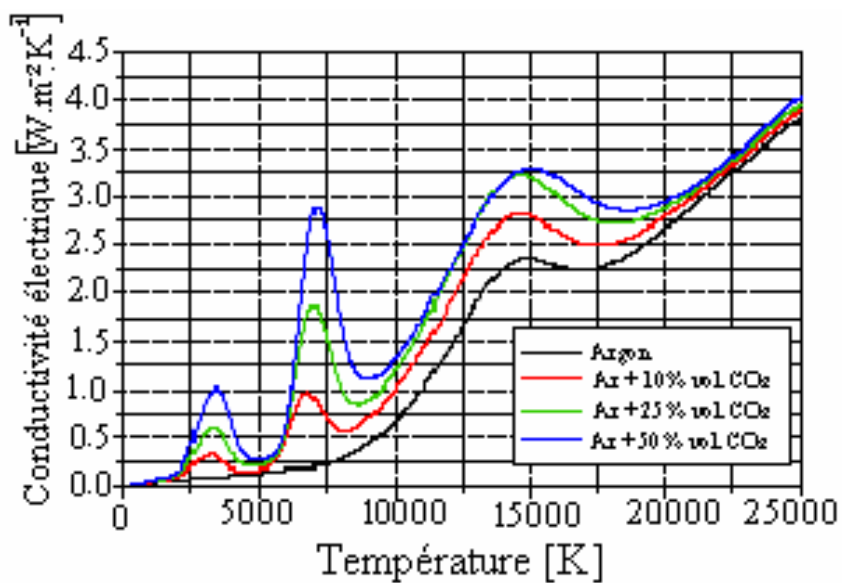


Figure IV.12 : Conductivité électrique d'un plasma de mélange Ar-CO₂ à l'ETL en fonction de T

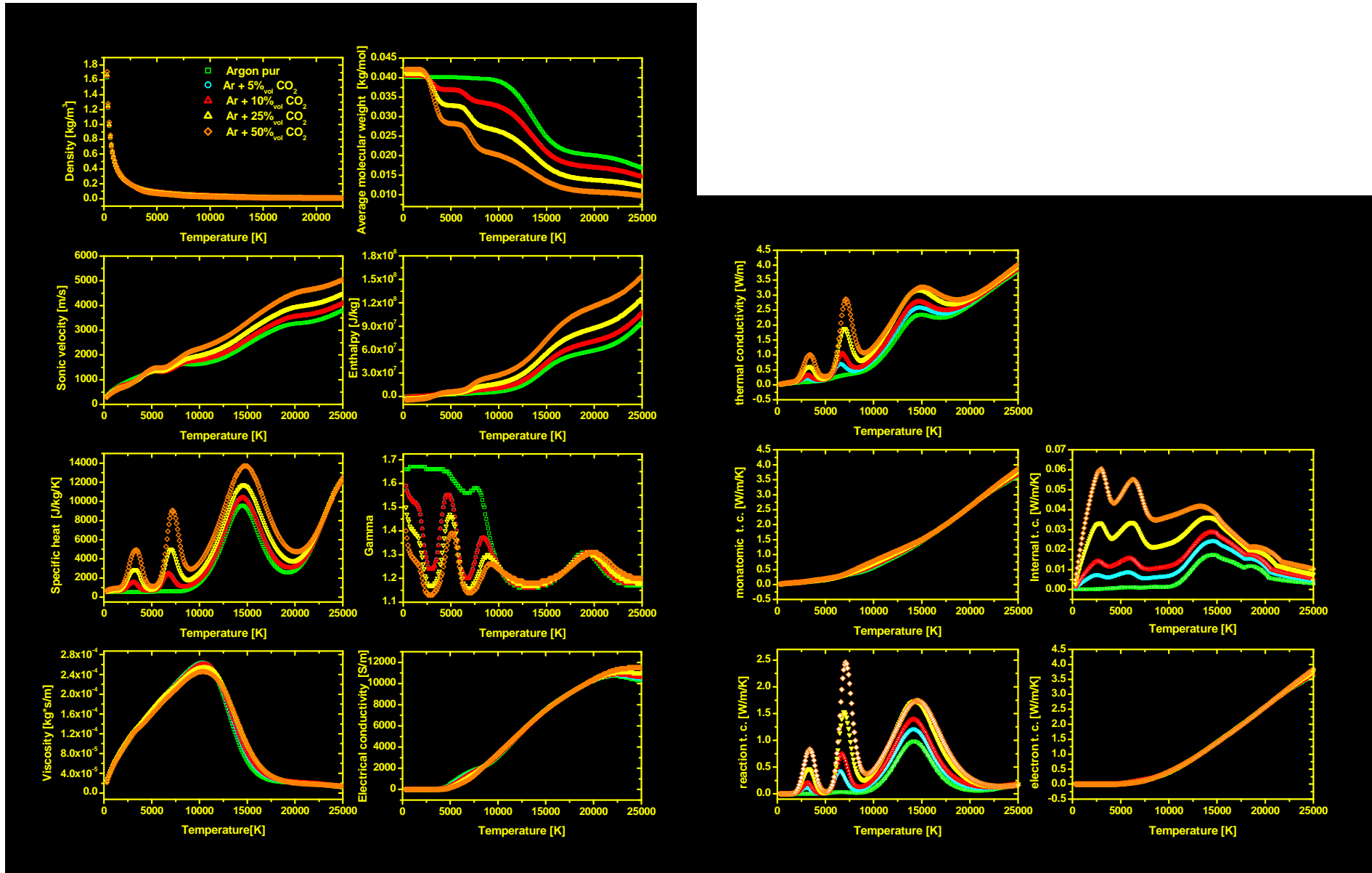
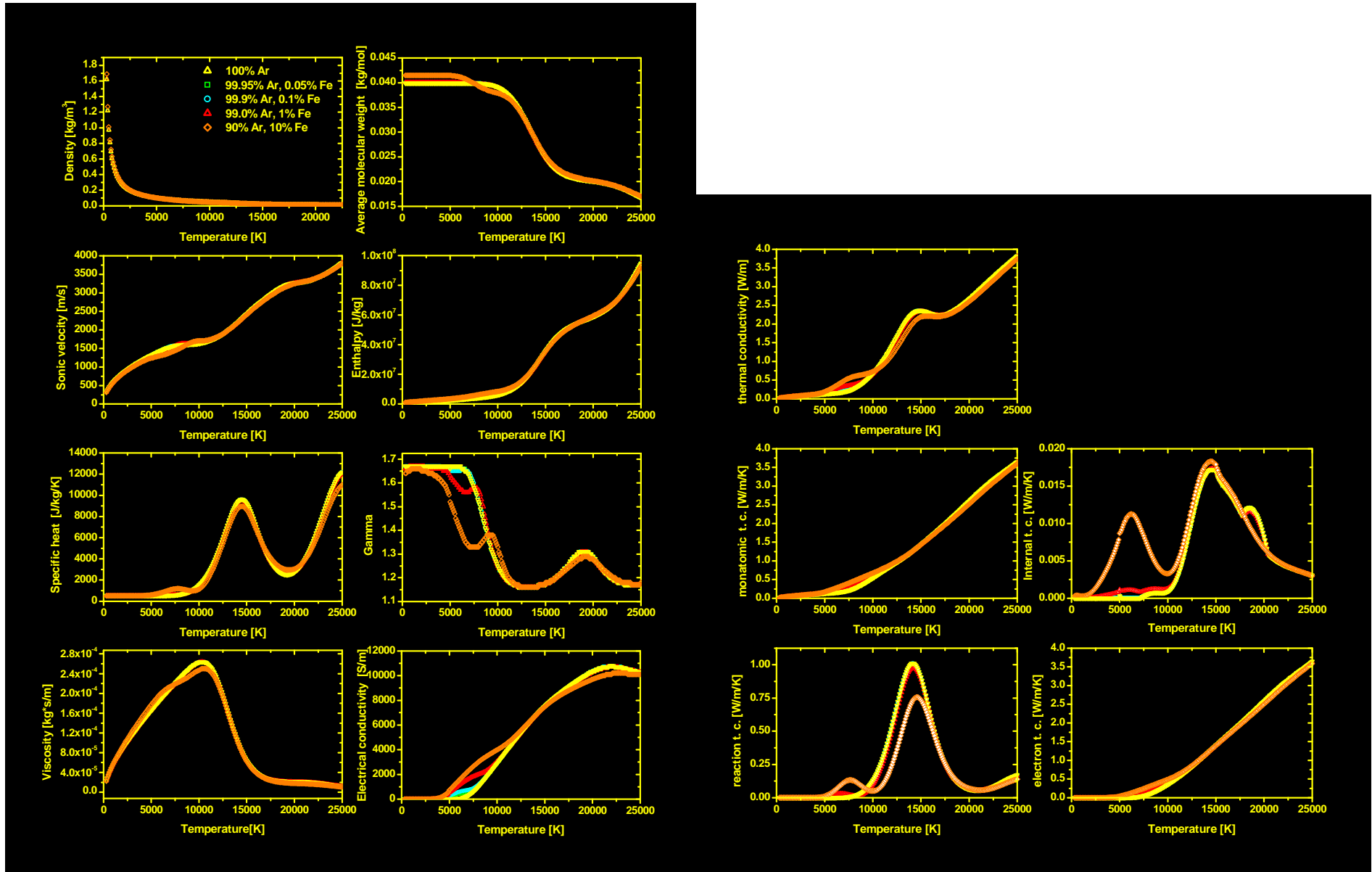
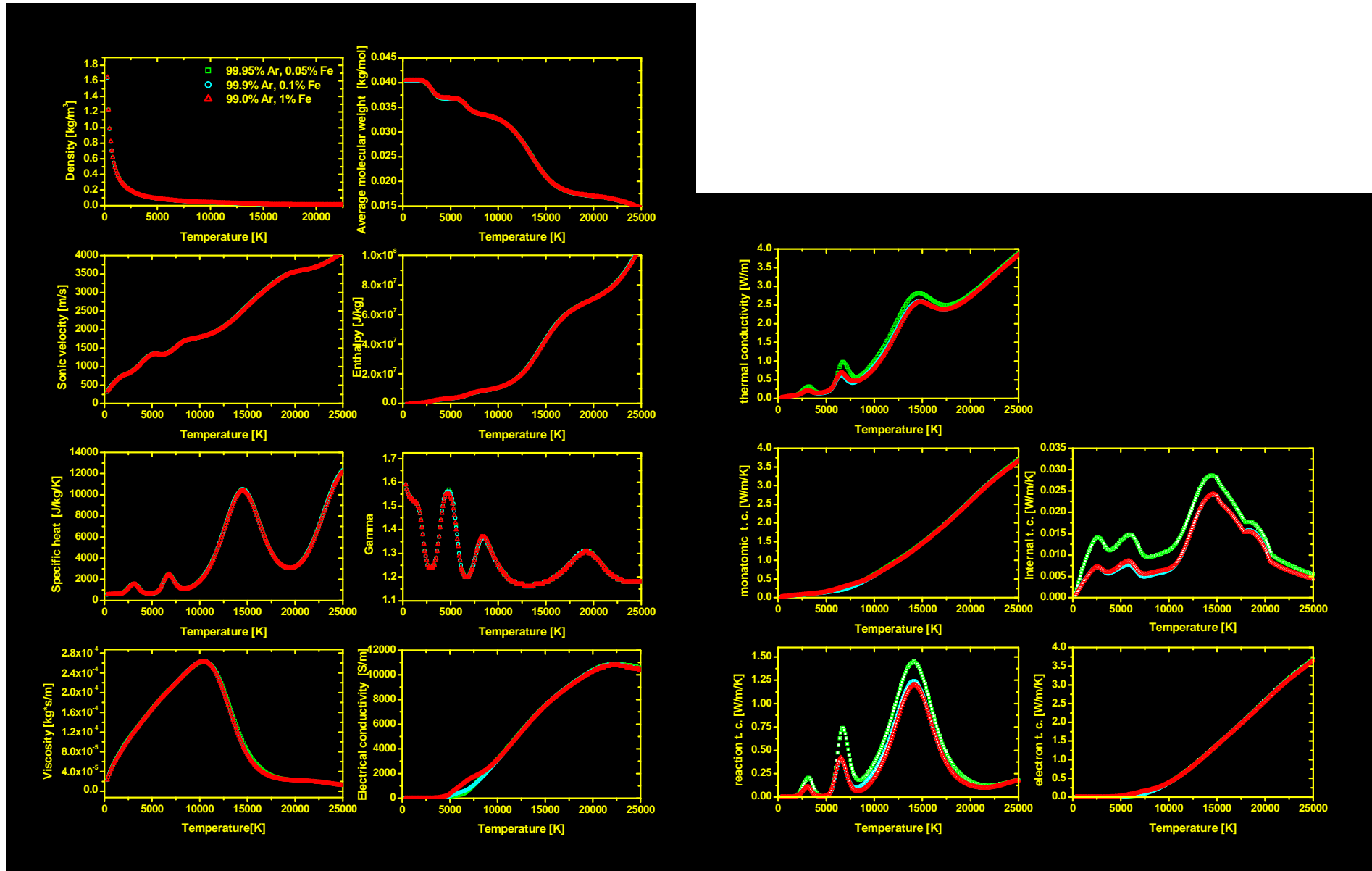


Figure IV.13 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-CO₂ + 1% Fe à l'ETL, en fonction du taux de CO₂ [selon Murphy *et al.* – Cf texte]



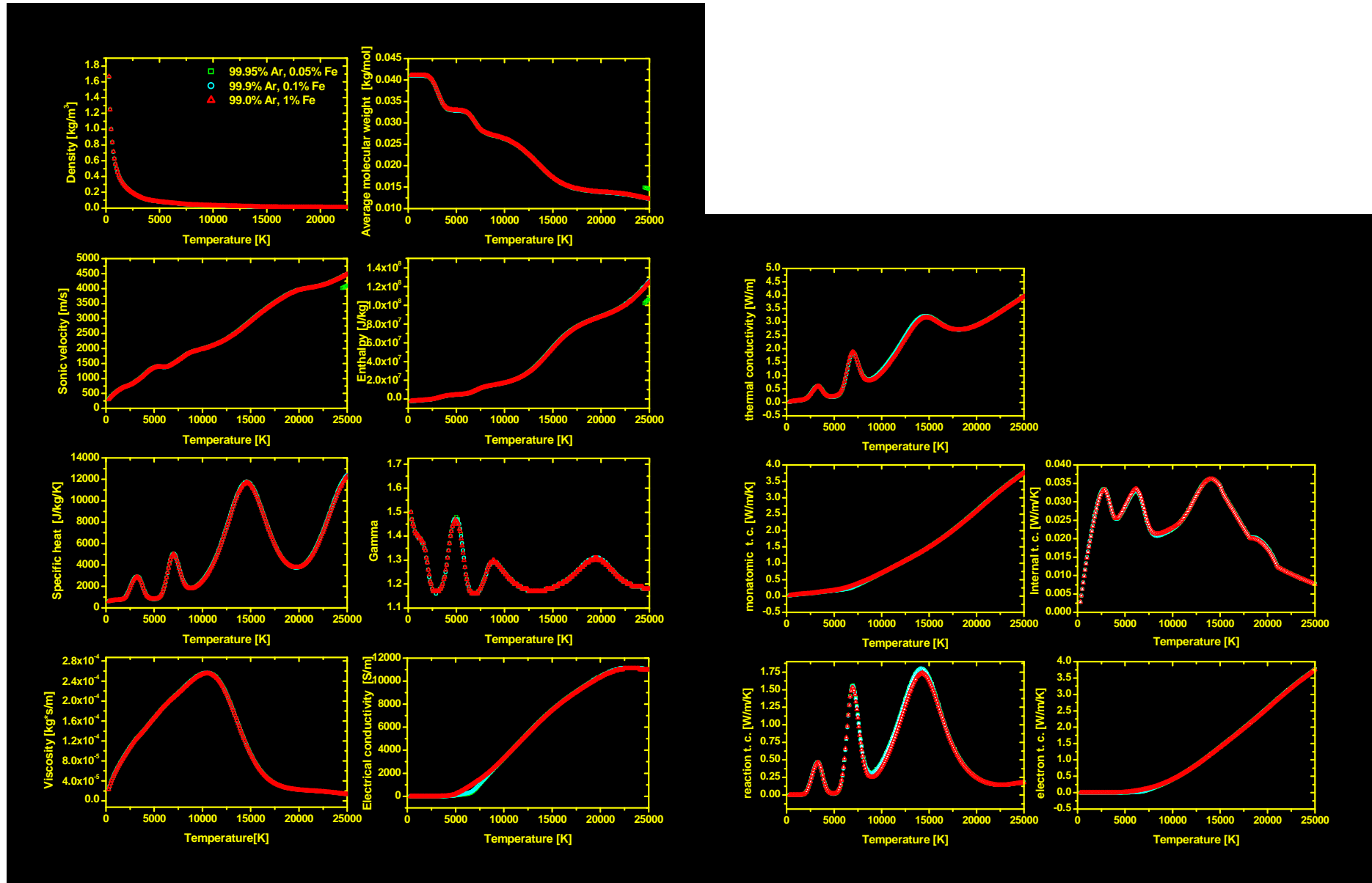
a/ argon pur

Figure IV.14 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-CO₂-Fe à l'ETL [selon Murphy *et al.* – Cf texte]



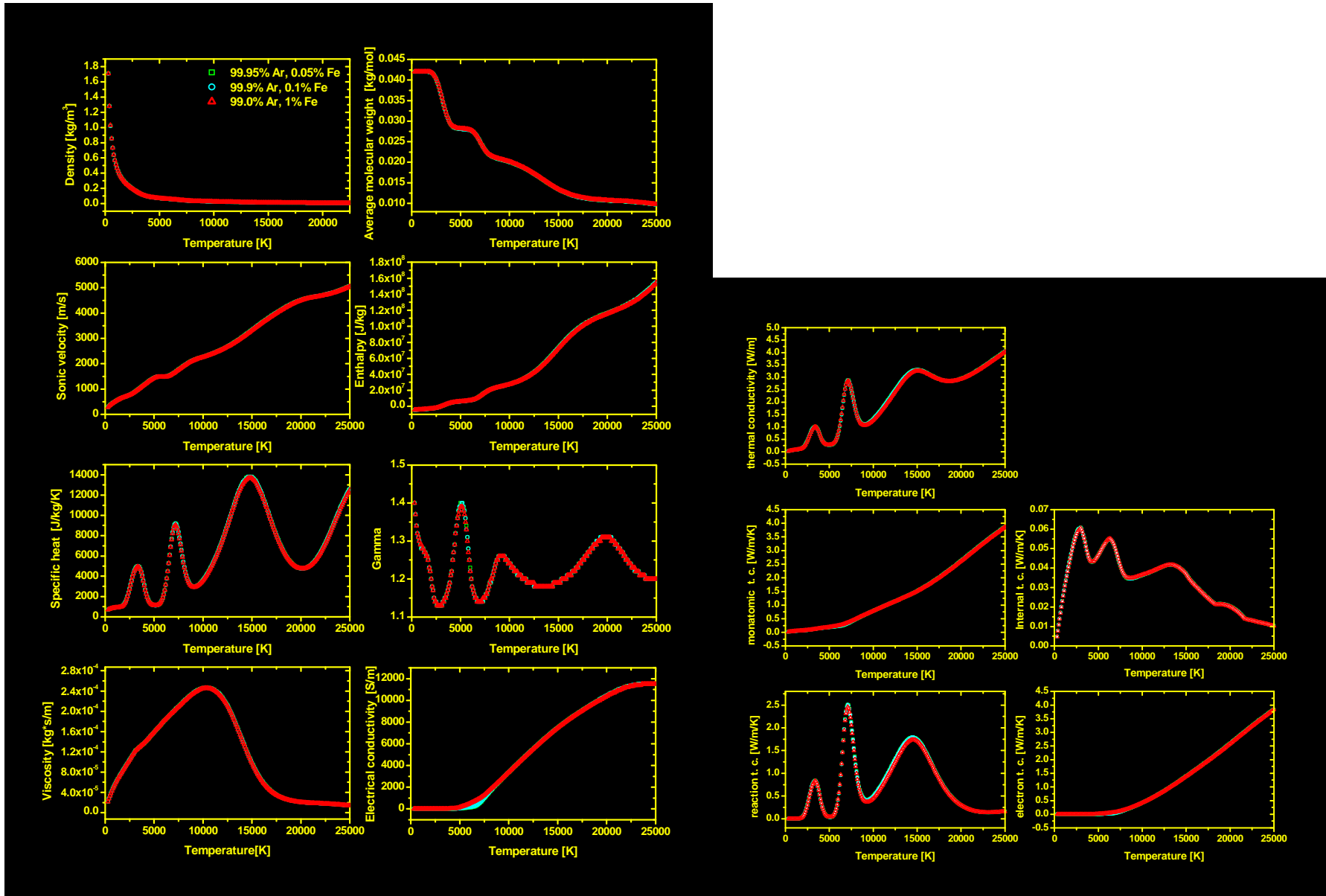
b/ Ar + 5% CO₂

Figure IV.14 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-CO₂-Fe à l'ETL [selon Murphy *et al.* – Cf texte]



c/ Ar + 25% CO₂

Figure IV.14 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-CO₂-Fe à l'ETL [selon Murphy *et al.* – Cf texte]



d/ Ar + 50% CO₂

Figure IV.14 : Propriétés de plasmas de mélange Ar-CO₂-Fe à l'ETL [selon Murphy *et al.* – Cf texte]

5. LES DIAGRAMMES D'ELLINGHAM

Lors du soudage, le métal liquide porté à haute température, est en contact avec l'atmosphère de travail, l'argon pur ou l'argon associé au CO₂. De l'air en faible quantité, amené par le tube-contact, peut aussi être présent dans le système, apportant en particulier du dioxygène. Du fait de la température élevée (de l'ordre de 2000 à 3000 K), on doit envisager deux milieux pouvant interagir entre eux, notamment par des réactions d'oxydoréduction conduisant à l'oxydation du fer et des autres métaux présents en plus faible quantité dans nos aciers (silicium, aluminium, manganèse...). Cette constatation nous amène à développer quelques rappels concernant l'aspect thermodynamique de ces réactions d'oxydation, en particulier la théorie des diagrammes d'Ellingham, largement utilisée en métallothermie industrielle.

5.1. Oxydation en présence de traces d'oxygène

Considérons dans un premier temps les interactions chimiques d'un métal liquide avec l'oxygène de l'air.

Les diagrammes d'Ellingham permettent de prévoir les réactions d'oxydo-réduction à l'équilibre thermodynamique, pour une pression d'oxygène et une température donnée.

Pour un métal M et un oxyde M_pO_q, tous deux à l'état solide, formant un couple oxydant / réducteur (M_pO_q / M), l'oxydation est décrite par la réaction :



pour la mise en jeu d'une mole de dioxygène gazeux.

La réaction est caractérisée par l'enthalpie libre standard de la réaction d'oxydation $\Delta_r G^\circ$. Dans l'approximation d'Ellingham, les enthalpies et entropies standard de réaction, respectivement $\Delta_r H^\circ$ et $\Delta_r S^\circ$, sont considérées comme indépendantes de la température ($\Delta_r H^\circ(T) \sim \Delta_r H^\circ(T^\circ)$ et $\Delta_r S^\circ(T) \sim \Delta_r S^\circ(T^\circ)$), ce qui permet d'écrire :

$$\Delta_r G^\circ(T) = \Delta_r H^\circ(T^\circ) - T. \Delta_r S^\circ(T^\circ) \quad (84.)$$

Grâce aux tables de grandeurs thermodynamiques, l'enthalpie libre standard peut alors être évaluée. C'est une fonction linéaire de la température, qu'on représente par une droite, dite droite d'Ellingham, en l'absence de tout changement de phase. La réaction d'oxydation étant exothermique (spontanée) en dehors des métaux nobles, la grandeur $\Delta_r H^\circ$ est négative. D'autre part, l'entropie standard des corps purs solides est très faible, et négligeable devant celle des gaz. Ainsi, la grandeur $\Delta_r S^\circ$ associée à la réaction (83.) se réduit, par la contribution de l'oxygène (en première approximation) à : $\Delta_r S^\circ \sim -205 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. La droite d'Ellingham associée à la réaction d'oxydation (83.) a donc une ordonnée à l'origine négative et une pente positive [Cf. Figure IV.15].

D'après la loi d'action de masses, l'équilibre est décrit par :

$$\Delta_r G^\circ + RT.\ln K = 0 \quad (85.)$$

où K est la constante d'équilibre de la réaction (83.). L'activité des corps solides étant égale à 1, l'équation précédente se ramène à une fonction de la pression partielle en oxygène :

$$\Delta_r G^\circ - RT.\ln(P_C/P^\circ) = 0 \quad (86.)$$

Les points de la droite d'Ellingham correspondent à des états d'équilibre de la réaction (83.), pour différentes conditions de température et de pression d'oxygène (appelés température et pression de corrosion, notés T_C et P_C), les 3 phases : métal, oxyde et oxygène gazeux coexistent alors.

L'affinité chimique \mathcal{A} étant définie comme :

$$\mathcal{A} = -\Delta_r G(T) = -\Delta_r G^\circ(T) - RT.\ln Q = -\Delta_r G^\circ(T) + RT.\ln(P/P^\circ) \quad (87.)$$

$\mathcal{A} = 0$ à l'équilibre et $P = P_C$

$\mathcal{A} > 0$ si $P > P_C$, le système évolue spontanément dans le sens 1 (formation de l'oxyde)

$\mathcal{A} < 0$ si $P < P_C$, le système évolue spontanément dans le sens 2 (formation du métal)

A une température T_{C1} donnée [Cf. Figure IV.15], les points au-dessus de la droite (point M_1) correspondent au domaine d'existence exclusive de l'oxyde, et les points en-dessous (point M_2) de la droite correspondent donc au domaine d'existence exclusive du métal (sens 2 de la réaction). L'oxydation a lieu pour une pression partielle d'oxygène minimale définie par P_{C1} .

La Figure IV.15 montre que la pression de corrosion augmente avec la température ($P_{C2} > P_{C1}$ si $T_{C2} > T_{C1}$). Cependant, les applications numériques mettent en évidence que ces pressions de corrosion sont très faibles !

On peut aussi remarquer qu'à pression de corrosion donnée, il y a oxydation pour $T < T_C$ (segment OM_0 pour $P = P_{C1}$ sur la Figure IV.15).

Dans le cas par exemple d'un métal d'aluminium pur et d'un acier Fe-Al à 1500 K :

- La pression partielle en dioxygène minimale pour observer la formation de l'alumine est $P_C = 2,4 \cdot 10^{-28}$ bar.

Si on envisage le cas des aciers, l'aluminium présent est en faible concentration dans le solide. Son activité est alors inférieure à 1 ce qui modifie la constante d'équilibre par rapport au cas d'un métal pur. On utilisera la concentration relative pour exprimer l'activité de cet élément :

$$a_{Al} = c/c_0 \quad \text{où } c_0 = 1 \text{ mol/l et } K = \frac{1}{\frac{P_C}{P^\circ} \cdot a_{Al}^{2p/q}} \quad (88.)$$

La pression partielle en dioxygène minimale pour observer la formation d'alumine, pour $a_{Al} = 10^{-2}$ est alors $P_C = 1,1 \cdot 10^{-25}$ bar.

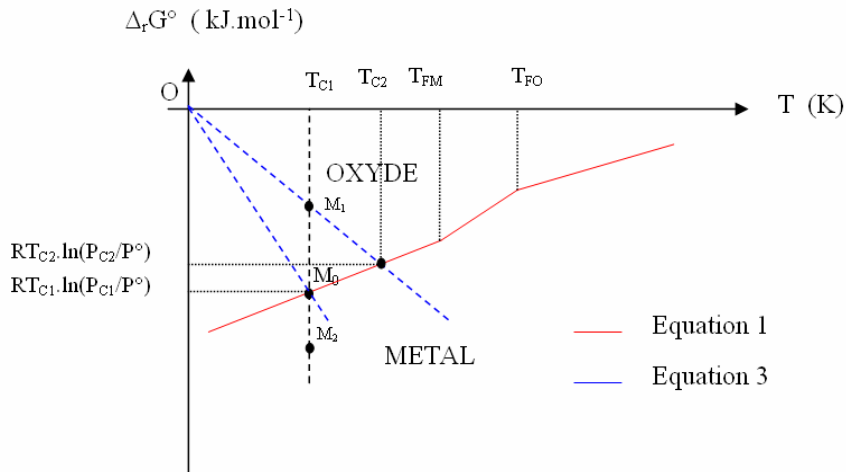


Figure IV.15 : Diagramme d'Ellingham d'un couple M_pO_q/M
[T_{FM} : température de fusion du métal, T_{FO} : température de fusion de l'oxyde]

Si on envisage un système à plus haute température, on va en général observer la fusion du métal à une température T_{FM} inférieure à la fusion de l'oxyde T_{FO} :



$$\Delta_r G_3^\circ = \Delta_r G_1^\circ - (2p/q) \cdot \Delta_r G_2^\circ \quad (91.)$$

où :
$$\Delta_r H^\circ_2 = \Delta_{\text{fus}} H^\circ_M \quad \text{et} \quad \Delta_r S^\circ_2 = \Delta_{\text{fus}} H^\circ_M / T_{FM} \quad (92.)$$

D'où :

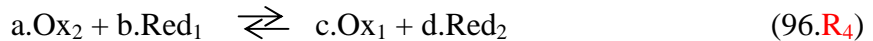
$$\Delta_r H^\circ_3 = \Delta_r H^\circ_1 - (2p/q) \cdot \Delta_r H^\circ_2 \quad (93.)$$

$$\Delta_r S^\circ_3 = \Delta_r S^\circ_1 - (2p/q) \cdot \Delta_r S^\circ_2 \quad (94.)$$

Dans le domaine de température compris entre T_{FM} et T_{FO} on a donc une augmentation de la pente de la droite d'Ellingham. Il en serait de même, pour l'évaporation du métal. Au contraire, la fusion puis l'évaporation de l'oxyde entraînent une diminution de cette pente [Cf. Figure IV.15].

5.2. Réduction des oxydes par métallothermie

Au sein de l'acier porté à haute température en présence d'oxygène, des réactions d'oxydo-réduction peuvent se produire entre métaux de différentes natures : conformément à la Figure IV.16, un oxyde ox_2 est réduit par tout métal red_1 dont la droite d'Ellingham se situe en dessous de la sienne, l'oxyde ox_2 et le métal red_1 ayant des domaines disjoints. Cette règle, dite « règle d'Ellingham » est largement mise en application en métallothermie :



Dans notre système de travail, l'(es) oxyde(s) de fer, s'il est formé, peut être réduit par l'aluminium dont l'oxyde est particulièrement stable.

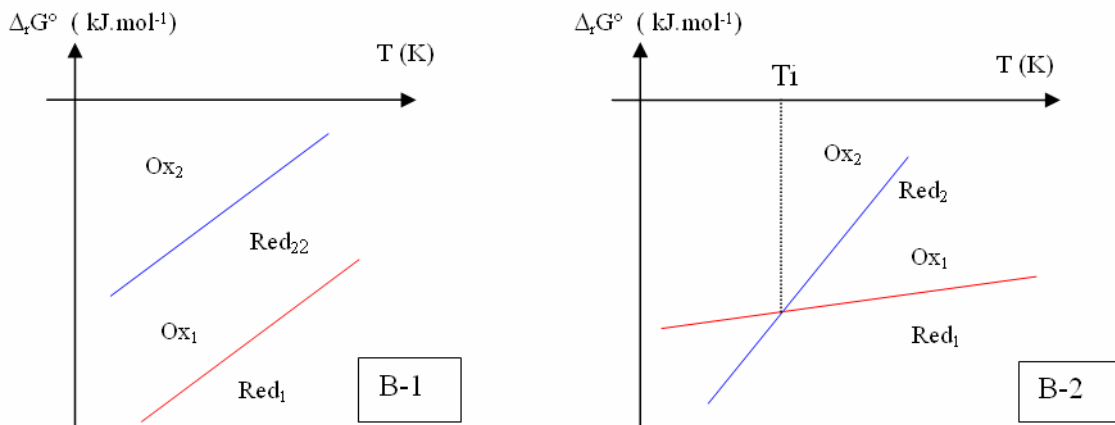
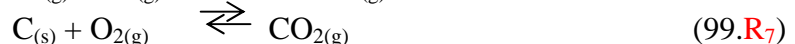
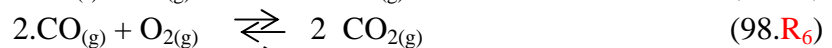


Figure IV.16 : Diagramme d'Ellingham : Utilisation

1- Domaines de stabilité des oxydes 1 et 2 (réaction 95) : cas de domaines d'existence exclusive. 2- Domaines de prédominance des oxydes 1 et 2 (réaction 96) : il y a un équilibre en T_i , où les 4 phases sont en présence.

5.3. Oxydation en présence de CO_2

L'élément carbone intervient dans plusieurs couples oxydant/réducteur : CO/C , CO_2/CO et CO_2/C à travers les réactions :



D'après les tables thermodynamiques, en écrivant l'enthalpie libre standard de réaction pour 97.R₅, 98.R₆ et 99R₇ dans l'approximation d'Ellingham, on montre que CO est instable en-dessous d'une température de 980 K. Le monoxyde de carbone ne devrait donc jamais être détecté à la température ambiante, mais des problèmes de cinétique de réaction entrent alors en jeu. Le couple CO_2/C est à envisager en-dessous de 980°K. Au-delà de cette température, les couples CO_2/CO et CO/C interviennent, définissant 3 domaines de prédominances [Cf. Figure IV.17].

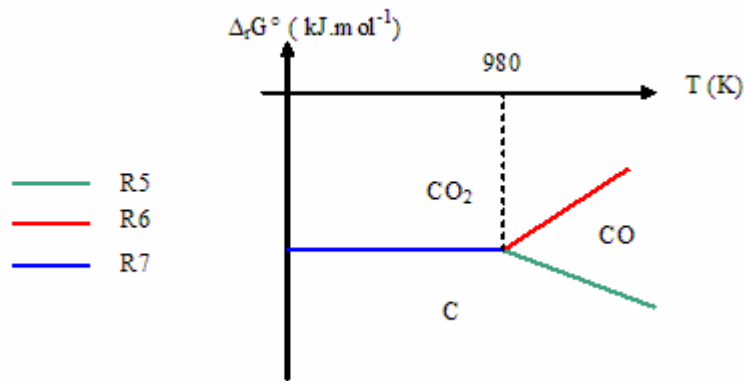


Figure IV.17 : Oxydation en présence de CO₂.

Dans ce contexte, un diagramme d'Ellingham superposant les enthalpies libres standard en fonction de la température pour les couples associés au carbone, CO₂/CO et CO/C (dans la gamme de température qui nous intéresse en soudage), au fer, et aux différents métaux présents dans le fil, permet de prévoir les comportements d'oxydation ou de réduction des différentes espèces (d'un point de vue purement thermodynamique). Ce diagramme est présenté Figure.IV.18, pour des réactions mettant en jeu une mole de dioxygène gazeux.

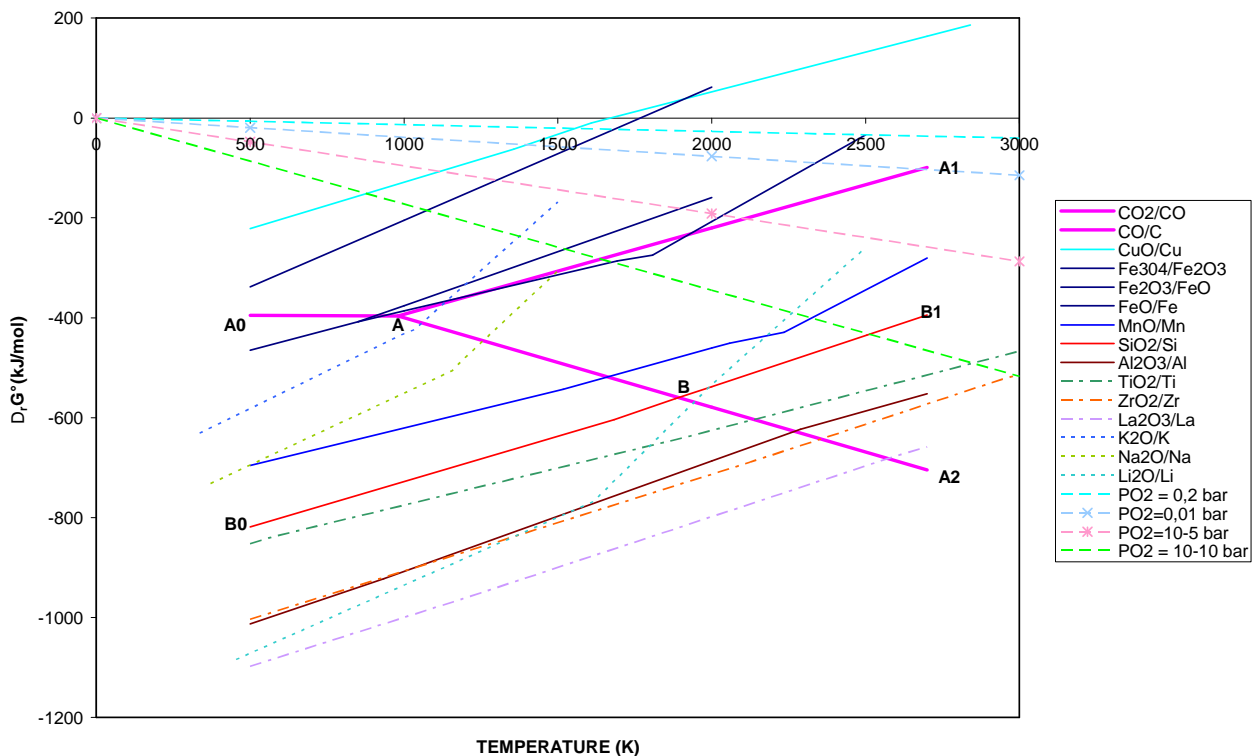


Figure.IV.18 : Diagramme d'Ellingham

Le cas du silicium par exemple montre [Cf. Figure.IV.18] que ce métal n'est pas stable en présence de CO₂. La thermodynamique prévoit différentes situations d'équilibre selon les valeurs de la température et de la pression d'oxygène:

- la formation de silice en présence de CO₂ (zone au dessus de A₀AA₁)
- la formation de silice en présence de CO (zone A₁ABB₁)

- la formation de silice en présence de carbone dans la zone (A_0ABB_0)
- la présence de silicium et CO dans la zone (A_2BB_1)

Pour compléter ce diagramme il est usuel de superposer aux graphes $\Delta_r G^\circ(T)$, les graphes $y(T) = RT \ln(P/P^\circ)$ définis pour différentes valeurs de la pression partielles en oxygène, qui conduisent à des abaques pression-température. On observe ainsi qu'à une température donnée, la pression de corrosion des divers métaux dépend de la valeur de $\Delta_r G^\circ(T)$: elle diminue d'autant plus que la droite d'Ellingham associée est basse dans le diagramme.

Sur la Figure.IV.18 nous avons représenté les droites $y(T)$ pour $P = 0,2$ bar (pression d'oxygène dans l'air), $P = 10^{-2}$, $P = 10^{-5}$ et $P = 10^{-10}$ bar.

5.4. Application des diagrammes d'Ellingham à notre problématique

i. Soudage sous argon pur

En l'absence de CO_2 , les réactions d'oxydoréduction peuvent avoir lieu entre les différents couples oxyde/métal se formant dans la goutte. Les traces d'oxygène vont gouverner ces réactions. On a montré précédemment que pour une température donnée, la pression minimale de corrosion est extrêmement faible ! La goutte évolue au sein d'un milieu très chaud. Quelque soit la composition du fil, nous pouvons faire l'hypothèse que les métaux et les oxydes éventuellement formés sont en majorité à l'état liquide (T_f du fer : 1808 K et T_{eb} du fer : 3023 K, T_f de Al_2O_3 : 2288 K).

Parmi les métaux présents dans notre acier standard, c'est l'aluminium qui est le réducteur le plus puissant, puis le silicium (droite d'Ellingham basse dans le diagramme – Figure.IV.18). L'aluminium étant en quantité très faible dans les fils utilisés, on s'attend à observer la présence d'oxydes d'aluminium et de silicium dans la goutte. Dans certains fils fourrés utilisés, nous trouvons aussi du zirconium, du lanthane ou encore du titane. Ces 3 métaux vont se comporter comme l'aluminium et le silicium, avec une tendance à s'oxyder encore plus importante en particulier pour le zirconium et le lanthane. Remarquons que ces deux métaux forment des oxydes particulièrement réfractaires [$T_{FO} = 2950$ K (ZrO_2), 2590 K (La_2O_3)], alors que l'oxyde de titane fond à 573 K. D'autres fils fourrés comportent des métaux alcalins caractérisés par une fusion du métal pur à basse température [$T_{FM} = 336,4$ K (Na), 454 K (Li)] ce qui entraîne un fort changement de pente des droites d'Ellingham à la fusion du métal. Ces métaux sont utilisés pour leurs propriétés de fondants. Remarquons le diagramme associé au Li, singulier par rapport au sodium et au potassium car la formation de l'oxyde Li_2O est assez favorable ($\Delta_r H^\circ = -598$ J.K⁻¹.mol⁻¹) et cet oxyde est très réfractaire ($T_{FO} = 2000$ K (Li_2O)).

Pour une pression d'oxygène donnée (droite $y(T)$ – Figure.IV.18), nous avons montré que l'oxydation d'un métal peut être évitée en dépassant une température critique. L'élévation du courant (par élévation de la température) pourra donc être favorable à la stabilisation des formes métalliques.

ii. Soudage sous mélange argon + CO_2 .

En présence de CO_2 , des réactions d'oxydo réduction mettant en jeu les métaux présents dans le fil anode, peuvent également avoir lieu avec les couples oxydant/réducteur liés au carbone : CO_2/C et CO_2/CO et CO/C [Cf. Figure.IV.18]. A des températures de l'ordre de 2000 – 3000 K, et sous pression partielle d'oxygène réduite, le CO_2 se décompose en CO et dioxygène (équation 98.R₆), favorisant l'oxydation des métaux.

D'après les diagrammes d'Ellingham [Cf. Figure.IV.18], selon la pression partielle en dioxygène, les phases stables présentes dans la goutte fondue pourront être très différentes:

- A $P/P^\circ = 10^{-10}$ bar, et 2700 K, ce qui peut constituer une situation extrême de pression partielle de O_2 (limite basse) et de température de la goutte (limite haute), seuls le zirconium, le lanthane, l'aluminium et le titane sont oxydés, les autres phases métalliques étant stables.

- A 10^{-5} bar et 2700 K, tous les métaux sont oxydés à part le fer et le cuivre et les alcalins.

Pour une pression partielle d'oxygène donnée (droite PO_2 Figure.IV.18) l'augmentation de la température provoque la stabilisation de certaines phases métalliques : par exemple à $P/P^{\circ}=10^{-10}$ bar, pour 2000 K, seuls potassium, le sodium, le cuivre et le fer sont stables à l'état de métal, tandis qu'à 2700 K, manganèse et silicium sont également stables. L'élévation du courant devrait donc permettre d'éviter la formation de certaines phases d'oxyde.

iii. Conclusion

Le soudage en présence de traces d'oxygène ou/et de CO_2 est propice à de nombreuses réactions d'oxydoréduction entraînant la formation de divers oxydes dans la goutte fondue. La prévision des réactions est cependant complexe car nous connaissons mal les propriétés physiques de notre milieu (notamment la température, la pression d'oxygène). De plus, il évolue rapidement par projection de gouttes et alimentation du fil, ainsi que par interaction avec le plasma. L'interprétation basée sur les diagrammes d'Ellingham, et donc des comportements à l'équilibre thermodynamique, ne peut ainsi qu'être indicative.

Avec ces précautions, les diagrammes d'Ellingham nous permettent de prévoir que les oxydes les plus probables sont ZrO_2 , La_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 et SiO_2 , formés par métallothermie ou par réduction de CO_2 en CO dans les gammes de température 2000 - 3000 K. La formation d'oxyde de cuivre est quant à elle improbable. Les oxydes de fer potentiels sont nombreux, mais ici leur formation est plutôt peu probable, excepté à basse température ($T < 2000$ K), où en présence d'une forte quantité d'oxygène). Dans ce cadre c'est l'oxyde FeO qui est attendu. Chez les alcalins, seul l'oxyde de lithium est attendu.

Compte-tenu de l'influence de la température, l'augmentation du courant permettra, dans les limites de l'appareillage, de limiter la formation des oxydes.

V - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1. INTRODUCTION : SCHEMA GENERAL

Le dispositif expérimental présenté sur la Figure V.1 a été décrit de façon détaillée dans la thèse de S. Zielinska [1]. Il comprend un générateur, un système de soudage automatique et un ensemble de moyens de diagnostics : des sondes de mesure électrique, un dispositif de cinématographie rapide et un montage spectroscopique.

Ces deux derniers nécessitent un alignement précis des éléments optiques et ne peuvent être déplacés aisément. C'est donc la pièce à souder qui se déplace et non la torche. Celle-ci est maintenue fixe au moyen d'un support monté sur une table micrométrique permettant un déplacement vertical précis pour régler sa distance par rapport à la pièce: au cours des essais, la distance entre le tube-contact et la pièce métallique sera donc fixée (à 20 mm), alors la longueur libre du fil (c'est-à-dire celle hors du tube-contact) sera un des paramètres du fonctionnement. Pour des raisons pratiques, la torche est maintenue selon un axe vertical, alors que dans le cas du soudage réel, la torche est inclinée à 45° par rapport à la verticale. Le support de la pièce est quant à lui fixé sur une table micrométrique assurant un déplacement horizontal perpendiculaire à la direction de soudage. Cela permet de débiter le cordon de soudure sur la pièce à l'endroit voulu. Enfin, cette table micrométrique est elle-même montée sur un chariot à vis sans fin entraînée par un moteur pas à pas, assurant le déplacement dans la direction de soudage au cours des essais.

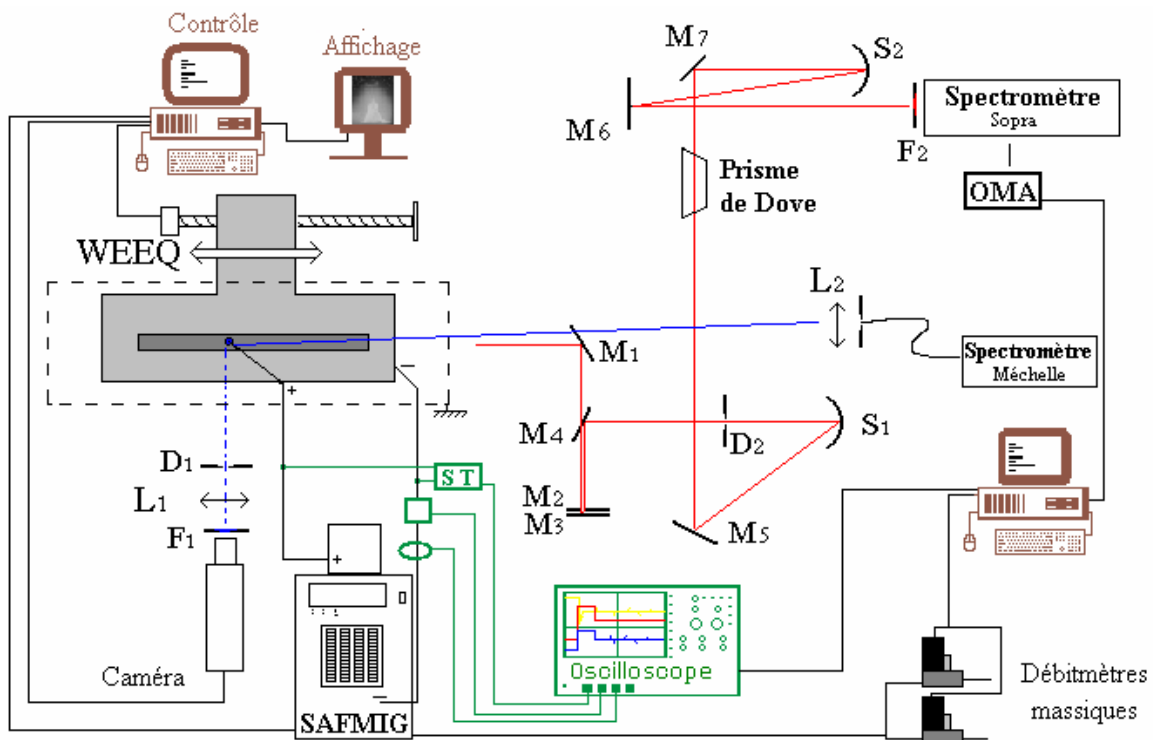


Figure V.1 : Dispositif expérimental.

Le support de la pièce, relié à la masse du générateur, est isolé du chariot de déplacement, en contact avec la masse du moteur pas à pas, à l'aide d'une plaque de bois.

Une enceinte en duralumin entoure la zone de déplacement du support de la pièce, afin de protéger le matériel et les utilisateurs des éventuelles projections de particules de métal incandescent et du rayonnement de l'arc. L'enceinte limite également la dispersion des fumées potentiellement nocives, contenant des fines particules d'oxydes métalliques et éventuellement du monoxyde de carbone. L'extraction des fumées est ensuite assurée par une hotte aspirante, qui n'est

mise en fonctionnement qu'après la fin de l'essai pour éviter que le flux d'air engendré ne perturbe le procédé (transfert des gouttes, plasma et cordon de soudure).

L'enceinte est percée de fenêtres de visée optique. Deux directions d'étude sont possibles : selon l'axe de déplacement de la pièce et perpendiculairement à celui-ci.

Pour assurer la maintenance du dispositif comme pour changer la pièce à souder, l'un des côtés de l'enceinte est constitué d'une trappe amovible.

2. L'INSTALLATION DE SOUDAGE

2.1. Le poste

Le poste de soudage utilisé est de type Safmig 480 TRS Plus équipé d'un kit Safmig 480 TR 16, fourni par le Centre Technique d'Application de la Soudure (CTAS, Air Liquide Welding, St Ouen l'Aumône).

Le SAFMIG 480 TRS Plus [annexe B] est une installation de soudage MIG-MAG utilisant une source de puissance transistorisée pilotée par microprocesseur 16 bits. Le microcontrôleur assure également la gestion du cycle de soudage, la mémorisation des paramètres, les sécurités et les gestions de la face avant (sélection du programme de soudage, pré-affichage, affichage et maintien des paramètres de soudage après soudage). La gamme de courant utilisable s'étend de 20 à 450 A. Pour la vitesse d'avance du fil, il est possible de choisir une valeur comprise entre 1 et 20 m/mn. Le pas du réglage est de 2 A pour le courant et 0,1 m/mn pour la vitesse d'avance du fil. La tension à vide est d'environ 65 V, en fonctionnement elle est de 14 à 45 V, selon les réglages utilisés. Le diamètre du fil-électrode utilisable est compris entre 0,8 et 1,6 mm.

Les essais sont réalisés en polarité inverse, avec un fil-électrode relié à la borne positive du générateur (anode). La pièce constitue alors la cathode et est reliée à la masse du générateur.

Dans une configuration classique utilisée habituellement en soudage, on choisit une vitesse d'avance du fil-électrode et on règle une consigne en tension. En mode manuel, ces deux paramètres sont réglés séparément mais en mode « synergie », seule la vitesse d'avance du fil est modifiée par l'opérateur. Les autres paramètres, comme la tension et le courant de soudage, sont calculés par le microcontrôleur en fonction du gaz de protection et du type d'électrode sélectionnés par l'opérateur.

Pour l'étude des régimes de fonctionnement en fonction du courant et du gaz de protection utilisé, il est nécessaire de contrôler indépendamment chaque paramètre et de s'assurer que les conditions expérimentales sont comparables d'un essai à l'autre. Pour cela un programme différent de celui d'origine a été utilisé : le courant d'arc I_{arc} est choisi comme consigne, et la vitesse d'avance du fil est choisie dans le but d'assurer une longueur d'arc régulière. Le mode de synergie n'est pas utilisé pour régler séparément chaque paramètre, mais les valeurs choisies sont en général proches de celles proposées par le microcontrôleur. Le changement de programme se fait par remplacement de l'EPROM du microcontrôleur.

Le générateur de soudage possède deux modes de déclenchement :

- Dans le mode 4T, un premier appui sur la gâchette de la torche provoque l'ouverture de la vanne de gaz pour purger les conduites ; le soudage est déclenché lorsqu'on relâche la gâchette de la torche, et interrompu lorsqu'on l'appuie à nouveau. Le gaz continue alors à sortir, pour protéger le métal encore chaud de l'air ambiant, jusqu'à ce qu'on relâche la gâchette. Ce mode est bien adapté si l'on doit manœuvrer manuellement la torche : il n'est pas nécessaire d'intervenir tant que le soudage est en cours.
- Dans le mode 2T, lorsqu'on appuie sur la gâchette de la torche le gaz est d'abord mis en circulation pendant une temporisation réglée au niveau du poste, puis le soudage débute. Ensuite lorsqu'on relâche la gâchette le soudage s'interrompt et le gaz continue à s'écouler

pendant une deuxième temporisation. Ce mode est plus adapté à une commande automatique du poste car il suffit de deux actions (appuyer et relâcher) pour commander l'ensemble de la séquence, la gestion de l'écoulement du gaz étant assurée par le poste.

2.2. L'alimentation en gaz

Pour assurer l'alimentation en gaz protecteur de la torche, deux débitmètres massiques Brooks Mass Flow Controllers 5850S, fabriqués par Brooks Instrument sont utilisés. Ils permettent la mesure et le contrôle du débit de gaz de 0 à 20 l/mn, sous une pression de 2 à 3 atmosphères [Cf. caractéristiques données en Annexe C].

Le fonctionnement des débitmètres est contrôlé à distance par un ordinateur (via un boîtier d'interface connecté sur le port série), à l'aide d'un logiciel fourni avec l'équipement, par Brooks Instrument. Celui-ci permet de gérer une liaison dynamique entre les débitmètres et une application fonctionnant sous l'environnement Windows. Une feuille de calcul du logiciel Microsoft Excel permet ainsi un contrôle permanent du débit des gaz en pourcentage volumique ou massique [Annexe D]. Tous les types de mélange gazeux peuvent être envisagés, mais la quasi-totalité des essais ont été réalisés avec de l'argon, du CO₂ et différents mélanges de ces deux gaz. Quelques essais ont été réalisés avec des mélanges argon-azote. Les gaz sont fournis par AIR LIQUIDE – [Cf. Tableau V.1]. Chaque débitmètre peut être ouvert de 1% à 100%, ce qui permet de choisir des mélanges à 1% près.

	Argon (ARCAL 1)	CO ₂
Density [kg/m ³]	1.67	1.87
Purity	≥ 99.99	≥ 99.7
Impurities [ppmv]		
H ₂ O	≤ 05	≈ 14
O ₂	≤ 02	≈ 20
CO / CO ₂	≤ 10	≈ 4 (CO)
CH ₄	≤ 05	≈ 2
N ₂	≤ 10	≈ 40

Tableau V.1 : Caractéristiques des gaz utilisés

2.3. Le support de la pièce

Les essais réalisés sont des cordons de soudure effectuée à plat sur une pièce en acier dont le support doit assurer plusieurs fonctions : Il doit permettre la fixation mécanique de la pièce sur la table mobile et assurer la liaison électrique avec la masse. Pour limiter l'adhésion des projections de métal fondu lors du soudage, le support est réalisé en duralumin. Il forme un T dont la partie la plus courte est fixée sur la table de déplacement, son épaisseur est de 8 mm.

Des trous filetés permettent de placer des brides de fixation pour immobiliser fermement la pièce. En effet au cours du soudage l'apport de température entraîne des contraintes mécaniques qui tendent à courber la pièce vers le haut, ce qui modifierait la distance entre celle-ci et la torche.

Le câble relié au générateur de soudage est fixé au support au milieu de celui-ci.

Les essais concernant l'étude de l'arc ont été réalisés avec un support plein avec des barres d'acier EN 10025 S235 JRG2 de 30×8 mm de section, pour une longueur de 300 mm. L'analyse chimique de l'acier est donnée dans le Tableau V.2.

Eléments		% mass.	sigma
C		0,059	0,009
Si		0,14	0,001
Mn		0,49	0,01
P		0,037	0,001
S		0,046	0,003
Cr		0,145	0,002
Mo		0,031	0,001
Ni		0,158	0,00
Al		0,003	0,000
Co		0,014	0,000
Cu		0,519	0,01
Nb		0,002	0,001
Ti		0,002	0,000
V		0,001	0,000
W	<	0,005	0,00
Sn		0,021	0,001
As		0,020	0,001
Zr		0,001	0,000
Ca		0,0005	0,0001
Sb		xxx	
Se		0,0019	0,0005
B		0,0002	0,0000
Fe		98,30	0,03

Tableau V.2 : Analyse chimique des barres d'acier sur lesquelles est appliqué le cordon de soudure (en % massique)

Pour certains essais visant à l'étude des gouttes transférées dans l'arc, un deuxième support a été réalisé. Sa forme et le point de fixation sont les mêmes que pour le premier, mais il présente une ouverture dans la longueur, parallèlement à la direction de soudage. Les brides de fixation sont disposées de façon à pouvoir placer deux barres parallèles séparées par un espace réglable au-dessus de l'ouverture du support. En plaçant un dispositif de trempe sous l'ouverture, il est ainsi possible de collecter le métal qui serait normalement transféré à la pièce. La trempe peut se faire soit sur plaque épaisse en aluminium, soit dans un récipient remplis d'eau ou d'huile. La première solution présente l'intérêt de limiter la pollution des gouttes récupérées, seule la partie en contact avec la plaque pouvant être altérée. Par contre la forme de la goutte peut être modifiée lors de son étalement, surtout si son diamètre est important. Les deux autres solutions limitent les déformations subies par la goutte et permettent de conserver sa structure interne mais risquent de conduire à une pollution de sa couche externe (oxygène, carbone...).

2.4. La commande du soudage

Le déclenchement de la séquence de soudage est entièrement automatisé. Le pilotage du moteur pas à pas, de marque Week Charly-Robot, se fait depuis un ordinateur via un boîtier d'interface, connecté sur le port parallèle. Le programme de commande est réalisé sous

l'environnement Labwindows et permet de régler la vitesse de déplacement de 0 à 5 mm/s (le pas du moteur correspond à 0,00375 mm) et de choisir la longueur et le sens du déplacement à effectuer. La course totale possible est de 250 mm, des butées de fin de course stoppant le système en cas de dépassement. Au niveau du programme, un compteur interrompt le déplacement si la distance parcourue devient supérieure à la course maximale.

Lors de l'exécution d'un déplacement, le programme commande également la fermeture d'un relais via un circuit électronique relié à la sortie du port parallèle. Ce relais ferme un circuit placé en dérivation de la torche, de sorte que le déplacement de la pièce commande le début du processus de soudage. Un interrupteur manuel, placé en série avec le relais, permet lorsqu'il est ouvert, de déplacer la pièce sans souder ; il assure également une fonction de sécurité en cas de blocage du système.

En utilisant le mode 2T du poste à souder, il suffit de commander le déplacement de la pièce pour déclencher l'ensemble de la séquence de soudage. Dans un premier temps la pièce va se déplacer pendant que le gaz de protection commence à s'écouler, puis à la fin de la temporisation le soudage débute. Après l'arrêt du déplacement, le gaz continue à être apporté jusqu'à la fin de la deuxième temporisation.

Ce mode de fonctionnement automatique permet à un seul opérateur de commander l'ensemble du processus et de gérer la prise de mesure par les différents moyens de diagnostic (spectroscopie et imagerie rapide).

2.5. Les électrodes utilisées

Le principal axe de recherche de ces travaux a porté sur l'étude de l'influence du fil-électrode sur la stabilité du processus en soudage. Sa composition et son diamètre en sont les caractéristiques les plus importantes. Idéalement, il faudrait pouvoir faire varier indépendamment chaque paramètre. Dans la réalité il existe des contraintes technologiques limitant les choix disponibles, et les fils fabriqués spécifiquement pour cette étude présentent toujours une certaine variabilité en diamètre, mais également en composition. Il a donc fallu tenir compte de ces limites dans les mesures réalisées.

i. Les fils massifs

Dans un premier temps des fils massifs ont été utilisés comme électrodes. Le fil de référence, utilisé précédemment par S. Zielinska [1] est un fil Nertalic 70 S (AWS A5.17) d'un diamètre de 1,2 mm. Il s'agit d'un fil en acier massif, simplement recouvert de cuivre pour assurer un meilleur contact électrique lors du passage dans le tube-contact. Sa composition est donnée dans le Tableau V.3. Il a été montré lors de travaux précédents (thèse de S.Zielinska [1], Cf. section III.7, page 44) que les éléments minoritaires de l'acier comme le silicium influent grandement sur le régime de soudage. Comme ils se concentrent fortement dans certaines zones de la goutte terminant l'électrode, des variations de composition de quelques millièmes sont suffisantes pour qu'un effet sur le soudage puisse être observé.

Le premier élément étudié est le silicium, qui peut former des oxydes (SiO_2 ...) très isolants : il s'agit donc, en diminuant le taux de Si dans l'électrode fusible, de limiter la formation de la gangue isolante qui se forme sous atmosphère oxydante à l'extrémité du fil-anode [Cf. Section III.7, page 44]. Deux compositions ont été testées, 0,12% Si (fil AS 35) et 0,064% Si (AS 26), le fil de référence ayant un pourcentage massique de silicium de 0,35%. Ces deux fils AS 26 et AS 35 sont normalement prévus pour le procédé de soudage par arc submergé. Dans ce cas le silicium complémentaire est apporté par le flux en poudre. Du point de vue du soudage MIG-MAG, de tels fils ne donnent pas de bon résultats en terme de joint réalisés ; néanmoins leur étude reste indispensable pour étudier l'influence du silicium sur le type de régime de transfert.

Elément	Composition (% mass.)	Composition (% at.)
Fe	98,17	97,47
Mn	1,07	1,07
Si	0,35	0,69
C	0,087	0,400
Cu	0,160	0,140
Ni	0,058	0,055
O	0,014	0,048
N	0,0062	0,0244
Cr	0,022	0,023
Mo	0,038	0,022
P	0,011	0,020
S	0,011	0,019
Co	0,008	0,007
V	0,002	0,002
Al	< 0,001	< 0,002
Nb	0,002	0,001
Ti	0,001	0,001
B	0,0002	0,0010
Zr	< 0,001	< 0,001

Tableau V.3 : Composition du fil-anode 70 S.

Les deux autres fils testés contiennent 0,1% (fil S₂MoTi) et 0,3% (fil AS 42) de titane en pourcentage massique. En effet, l'oxyde de titane TiO₂ est conducteur à haute température : dans ce cas, il s'agit de rendre conductrice la gangue qui de formera sous atmosphère oxydante.

Les compositions complètes de chaque fil sont données en annexe [E1], le Tableau V.4 rappelle les concentrations des éléments étudiés. Idéalement, tous les autres éléments que ceux testés (titane et silicium) devraient être présents en quantité identique pour tous les fils étudiés. On constate que si pour certains éléments (Ni, C), les teneurs sont comparables, des différences plus importantes peuvent être observées pour d'autres, en particulier le manganèse pour le fil AS 26.

Eléments Fils	Si	Ti	Zr	La	Li	Na	K
70 S (Référence)	0,35	0,001	< 0,001				
AS 26	0,064	< 0,003					
AS 35	0,12	< 0,003					
S ₂ MoTi	0,37	0,105	0,0017				
AS 42	0,26	0,303	0,0023				

Tableau V.4 : Concentrations des éléments étudiés pour les fils massifs (en pourcentage massique)

Eléments Fils	Si	Ti	Zr	La	Li	Na	K
G002	0,048						
G003	0,074	0,94					
G004	0,001						
G005	0,060		0,36				
G006	0,050		0,33	0,26			
G007	0,007				0,005		
G008	0,010					0,042	
G009	0,008						0,150
G010	0,061				0,005		0,093
G011	0,320				0,005		0,102
G012	0,012				0,143		
Mégafil 710M	0,80				0,017	0,130	0,460

Tableau V.5 : Concentrations de quelques éléments pour les fils fourrés (teneurs en pourcentage massique)

ii. Les fils fourrés

Le choix des compositions possibles en fil plein étant assez limité, l'étude s'est prolongée en utilisant des fils fourrés. Ils permettent d'employer une grande variété d'éléments, en modifiant la composition du flux utilisé. Les fils testés appartiennent à la catégorie des fils métalliques ou « metal core ». Le flux est donc essentiellement constitué de poudre métallique, majoritairement du fer.

L'étude de l'influence du silicium s'est prolongée avec deux fils contenant 0,048% Si (G002) et 0,001% Si (G004). Il faut noter que le fil G002 avait été préparé dans le but de servir de comparaison avec le fil massif AS 26, pour étudier l'influence de la nature du fil (massif ou fourré). Le taux de silicium du produit fini est cependant légèrement inférieur (0,048% Si) à celui du fil massif correspondant (AS 26 : 0,064% Si).

Un fil contenant 1% de titane (G003) a été étudié, ainsi que deux fils contenant 0,3% de zirconium, le second contenant en plus 0,3% de lanthane (G005 et G006 resp.). En effet, tout comme TiO_2 , l'oxyde de lanthane La_2O_3 est connu comme étant conducteur à haute-température.

La dernière solution retenue était d'abaisser la température de fusion des phases oxydes en utilisant des fondants. Aussi, les autres fils testés contiennent-ils du lithium (G007 : 0,005% Li et G012 : 0,143% Li), du sodium (G008 : 0,042% Na), du potassium (G009 : 0,150% K), du lithium et du potassium (G010 et G11 : 0,1% K + 0,005% Li) voire les trois alcalins (Mégafil : 0,13% Na + 0,017% Li + 0,46% K). Parmi ces fils, deux contiennent un taux de silicium important (Mégafil : 0,8% Si et G011 : 0,320% Si), les autres ont un taux de silicium voisin du fil G002 (fil G010) ou un taux encore plus faible (G007, G008, G009 et G012).

Si la composition d'un fil fourré peut être choisie théoriquement, les proportions finales des éléments présents dans le produit peuvent être légèrement différentes de ce qui était visé initialement. Les fils G002, G003, G005, G006 et G010 ont par exemple été réalisés en cherchant à se rapprocher le plus possible du taux de silicium du fil AS 26 (0,064% Si) : après fabrication, on constate qu'une dispersion plus ou moins importante existe, et l'analyse des résultats devra en tenir compte.

Dans le cas général, la principale différence de composition par rapport aux fils pleins, est un taux d'oxygène beaucoup plus important. Cela est dû à la nature lacunaire de la poudre et il n'est pas possible techniquement de diminuer la valeur de cette concentration. L'autre difficulté liée à l'étude des fils fourrés provient du mode d'apport des éléments choisis : comme il n'est pas possible de les introduire sous forme pure, il faut choisir le composé présentant le moins d'interaction avec le phénomène étudié. Dans la majorité des cas les éléments ont été introduits sous forme de fluorure, sauf le potassium qui a été introduit sous forme de carbonate.

L'analyse complète de chaque fil est donnée en annexe [E2]. Le Tableau V.5 récapitule les concentrations des différents éléments étudiés pour chaque fil.

3. LES DIAGNOSTICS ELECTRIQUES

La mesure des paramètres électriques de l'arc de soudage fournit une information importante sur le procédé. Les essais sont réalisés avec une consigne de courant et le poste dispose d'un afficheur indiquant la tension et le courant moyen. Cependant la vitesse d'acquisition est peu élevée et ces valeurs comportent une certaine incertitude, le processus de soudage en utilisation industrielle ne nécessitant pas une précision extrême. Pour obtenir des résultats exploitables sur toute la durée du processus avec une résolution temporelle suffisante, des sondes de courant et de tension externes sont utilisées. Les données sont enregistrées sur un oscilloscope numérique LecroyWaverunner-2 LT584L 4 voies (bande passante 1 GHz, fréquence maximum d'échantillonnage 4 GS/s) isolé du secteur par un transformateur d'isolement. Il est ensuite possible de transférer sur un ordinateur les fichiers en format ASCII pour les archiver. Au moyen d'un tableur, il est alors possible d'afficher et de traiter les données.

3.1. La mesure du courant

Le courant constituant la consigne choisie, il est important de connaître la valeur exacte appliquée. L'évolution du courant au cours du soudage est par contre moins importante car elle dépend principalement de la régulation du poste. La mesure du courant est réalisée au moyen d'une sonde de courant LT 500-S LEM à bobine d'induction ayant une bande passante de 150 kHz. Elle est placée en série sur le câble de masse relié à la cathode et fournit une tension de 1 V pour 200 A mesurés. Une deuxième sonde utilisant un shunt ayant un rapport de 500 A pour 0,1 V complète le dispositif de mesure.

3.2. La mesure de la tension

Avec le mode de régulation utilisée, la tension dépend des conditions de fonctionnement. Son étude permet de caractériser la stabilité du processus et d'analyser certains phénomènes comme le détachement des gouttes. Elle permet également de distinguer le fonctionnement transitoire suivant l'amorçage de l'arc, qu'il ne faut pas prendre en compte, du régime stationnaire établi après environ 1,5 s et au cours duquel les diagnostics doivent être réalisés.

La tension à l'entrée du poste est de l'ordre de 300 V à vide, et pour une valeur comprise entre 20 et 70 V en sortie. Sa mesure est réalisée au moyen d'une sonde différentielle ST500-2 Française d'Instrumentation d'une bande passante de 15 MHz et de rapport d'atténuation 1/20. La prise de masse se fait au niveau du support de la pièce. Pour la borne positive, l'idéal était d'effectuer la mesure le plus proche possible de l'arc, au niveau du tube-contact. Mais cette solution perturbait l'écoulement du gaz au voisinage même de la colonne de plasma, et nous avons préféré connecter la sonde en amont de l'écoulement, au niveau de la gâchette de soudage.

Les câbles de la sonde sont recouverts d'un blindage en papier d'aluminium, relié à la masse, pour éviter les perturbations électromagnétiques. L'enceinte en duralumin elle aussi est reliée à la masse pour éviter de constituer une masse flottante.

3.3. La synchronisation

Pour corrélérer les signaux électriques avec les autres enregistrements réalisés (spectroscopie, cinématographie rapide), la quatrième voie de l'oscilloscope est utilisée pour enregistrer un signal de synchronisation :

- soit généré directement par le dispositif d'enregistrement au début de l'acquisition (matrice CCD utilisée pour le diagnostic spectroscopique, caméra rapide prêtée par Air Liquide) ;
- soit mesuré sur le port série de l'ordinateur lors de l'utilisation de la caméra rapide du laboratoire, qui ne possède pas de signal de déclenchement extérieur. L'écart correspondant au temps de transfert de la commande dans le câble et le déclenchement de la caméra peut être négligé, compte tenu de la vitesse d'acquisition (< 350 images/s).

4. L'IMAGERIE RAPIDE

4.1. Le montage optique

Pour obtenir une image suffisamment grande d'un objet avec une caméra, il est nécessaire de placer l'objectif le plus près possible de l'objet. Dans le cas du soudage, cela pose le problème de la protection de la caméra contre les projections de métal incandescent. L'enceinte entourant la zone de soudure impose une distance minimale de 15 cm entre la fenêtre de visualisation et l'arc. Pour disposer d'un grandissement suffisant et ajustable, nous avons utilisé une lentille supplémentaire placée sur un rail optique.

Selon la lentille utilisée, il est possible d'obtenir un grandissement de 1 à 10 par rapport à l'objet initial. Cependant le grandissement effectif dépend également des caractéristiques de l'objectif de la caméra. Pour connaître les dimensions réelles de l'objet étudié, des enregistrements de calibrage sont effectués avec un objet dont la dimension est connue. Le fil de soudage, dont le diamètre peut être mesuré avec une bonne précision avec un Palmer, est ainsi généralement utilisé pour la détermination de l'échelle des photographies.

Pour limiter les aberrations optiques, en particulier lorsque le grandissement utilisé est important, un diaphragme est ajouté devant la lentille. Outre l'amélioration de la qualité de l'image, il permet également une plus grande liberté dans le réglage du diaphragme inclus dans l'objectif de la caméra.

4.2. Les caméras utilisées

i. Caméra MVS-135

Dans un premier temps les essais ont été réalisés au moyen d'une caméra MVS-135 (Machine Vision Sensor) fabriquée par Fastcom Technology. Elle est équipée d'une matrice de photodiodes Fuga 15d (C-Cam Technology) de type CMOS. Le capteur d'image à haute dynamique (120 dB) a une taille de $7,5 \times 7,5$ mm pour 512×512 pixels de $12,5 \times 12,5$ μm .

La réponse spectrale, représentée sur la Figure V.2, est maximale pour une longueur d'onde de l'ordre de 480 nm, mais outre la gamme visible, le capteur est également sensible au proche infrarouge, jusqu'à 1000 nm.

Les images obtenues sont en niveaux de gris, codé sur 8 bits. La caméra est connectée à un ordinateur via un port série (RS 232). Il est possible de régler les différents paramètres comme la vitesse d'acquisition ou le contraste et de sauvegarder les données. Un second écran de contrôle assure la visualisation des images en temps réel. Lors de l'enregistrement, une séquence d'image est stockée dans la mémoire « flash » de la caméra dont la capacité (1024 ko) limite la taille maximale. Les images sont ensuite sauvegardées manuellement une par une en format bitmap. Elles peuvent alors être traitées directement et, pour avoir un aperçu de l'aspect dynamique du processus, il suffit de reconstituer la séquence animée en utilisant un logiciel disponible dans le commerce.

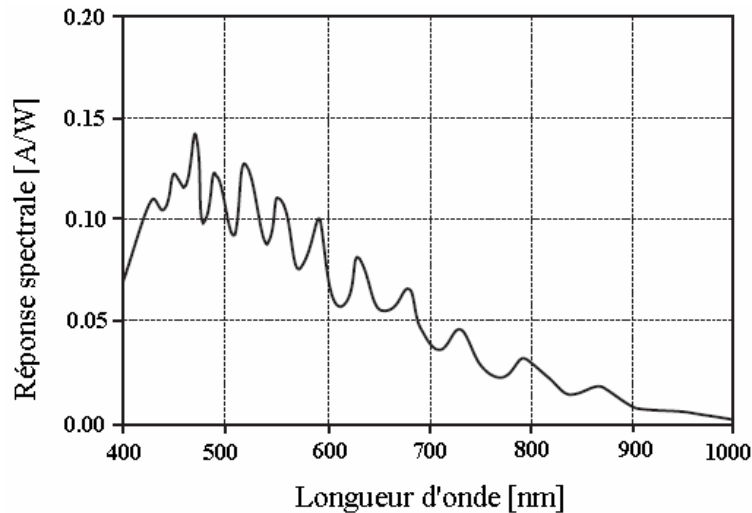


Figure V.2 : Réponse spectrale de la caméra Fastcam MVS-135

Les capteurs CMOS peuvent être réglés au niveau en contraste, ce qui permet d'éviter les problèmes de saturations rencontrés avec les capteurs CCD et autorise l'acquisition d'images d'objets de luminosité différente. Cependant ils sont sujets à un bruit, appelé « fixed pattern noise » (FPN), dû à la très faible disparité de la réponse individuelle de chaque pixel. Pour obtenir une image de bonne qualité, il est donc nécessaire de procéder à un calibrage avant toute mesure, en plaçant un papier calque uniforme devant la source lumineuse. Les signaux issus de chaque pixel sont alors corrigés en temps réel à partir de cette image de référence pour tous les enregistrements ultérieurs. Le processus de calibrage est assez long et nécessite une bonne stabilité de l'émission lumineuse. Comme le temps maximal de soudage est de l'ordre de 1 minute et que la lumière de l'arc est souvent irrégulière, on ne l'utilise pas directement pour le calibrage. Elle est remplacée pour cette étape par une lampe halogène de 1000 W.

La fréquence maximale d'acquisition de la caméra dépend de la taille de l'image enregistrée : plus elle est petite et plus l'enregistrement est rapide. Dans tous les cas, quelle que soit la vitesse d'acquisition, la durée totale de l'enregistrement (limitée par la taille de la mémoire flash de la caméra) est d'environ 220 ms. Il faut alors trouver un compromis entre une vitesse suffisante et une résolution acceptable. En ne sélectionnant par exemple qu'une zone de 144×144 pixels actifs, on peut choisir un grandissement tel que 1 pixel correspond à environ 100 µm sur la colonne d'arc. La fréquence d'acquisition est alors de 109 images par seconde.

ii. Caméra Fascam-1024PCI

Une partie des essais a pu être réalisée en utilisant une caméra plus performante, prêtée par Air Liquide. Il s'agit d'une caméra FASTCAM-1024PCI HW fabriquée par Photron. Le capteur, également de type CMOS, a une taille de 17,4×17,4 mm pour 1024×1024 pixels de 17×17 µm. L'image obtenue est en niveaux de gris, codés sur 10 bits. L'ajustement de calibrage des pixels est réalisé à partir d'un fichier de correction chargé dans la mémoire de la caméra. Outre l'effet d'un diaphragme éventuellement inclus dans l'objectif, le choix de l'obturateur électronique de la caméra permet de régler le niveau d'exposition. La vitesse d'obturation, qui doit être supérieure à la vitesse d'acquisition, peut être au maximum de 1/657000 s. Plus elle est élevée et plus un événement rapide pourra être enregistré avec précision, mais moins l'intensité lumineuse captée sera élevée. Pour une obturation à 1/30000 s associée à une vitesse d'acquisition de 1/3000 s, chaque image dure 33 µs et est séparée de 333 µs de la suivante. Un tel réglage permet de visualiser avec une bonne netteté l'accrochage de l'arc, c'est-à-dire l'extrémité de l'électrode d'où se détachent les gouttes et le plasma environnant. Par contre le plasma le plus éloigné du fil, moins lumineux, est peu visible. Comme pour la première caméra, la vitesse d'acquisition dépend de la taille de l'image enregistrée.

La mémoire d'acquisition étant plus importante (2 Go), pour la vitesse choisie il est possible d'enregistrer pendant plusieurs secondes. Le grandissement utilisé, résultant du positionnement de la lentille et du réglage de l'objectif de la caméra, permet un grandissement tel que 1 pixel correspond à 10 μm .

Les données peuvent être enregistrées soit sous forme de séquence d'images, soit directement sous forme de fichier vidéo. La caméra peut être associée à un autre dispositif d'enregistrement : elle génère un signal de déclenchement au début de l'acquisition, ce qui permet d'assurer directement la synchronisation entre les images et, par exemple, l'enregistrement sur oscilloscope des paramètres électriques du soudage.

4.3. L'utilisation de filtre

Etant donné l'intensité de la lumière, il est difficile d'observer directement l'arc de soudage, et l'enregistrement de la forme de l'arc exige l'usage d'éléments optiques supplémentaires. Un filtre interférentiel bleu (CVI F03-468.8-4-1.00) centré sur 469,2 nm (FWHM 3nm) a ainsi été utilisé pour cette étude. La zone spectrale retenue pour cette étude est caractérisée par l'absence de raies d'argon, mais par contre une émission intense de raies du fer et de manganèse. Par ailleurs, le fond continu de l'argon y dépend très peu de la température et peut être considéré comme proportionnel au carré de la densité électronique.

Il est ainsi possible de visualiser la zone probable de passage du courant (fond continu de l'argon) où le métal est présent en grande quantité (conductivité électrique élevée), qui correspond alors à la partie la plus lumineuse de l'image enregistrée avec la caméra rapide. Ceci a pu être vérifié expérimentalement par enregistrement simultanée de l'image de l'arc sur la caméra rapide, et du spectre émis par le plasma sur la matrice de OMA [1]. L'étude des images permet donc, outre de caractériser le régime de fonctionnement de l'arc, d'avoir une information sur la géométrie des lignes de courant, ce qui est utile pour le calcul des forces électromagnétiques agissant sur la goutte.

Le contraste obtenu avec le filtre interférentiel est suffisant pour étudier également le transfert des gouttes dans l'arc. Cependant, seules les zones où le plasma est présent sont visibles et le haut du fil, à l'endroit où débute sa fusion, est difficile à observer. Nous avons alors utilisé un dispositif d'éclairage de la zone de soudage (quelques centimètres carrés) par un plan laser généré par une diode TH-C3830/40-F4 de marque THALES, de longueur d'onde 838 nm et d'une puissance de 30 W. Il est possible d'enregistrer directement les images, en ajustant le contraste sur la caméra. Pour n'observer que le transfert du métal dans l'arc, on utilise en complément un filtre interférentiel centré sur la longueur d'onde du laser. L'émission de l'argon étant faible dans cette bande spectrale, on observe presque uniquement la lumière réfléchie par le fil et les gouttes.

5. LA SPECTROSCOPIE

5.1. Les spectromètres utilisés

Deux spectromètres différents ont été employés au cours de l'étude. Le premier, d'une grande résolution, permet l'étude détaillée des raies. Le second a une résolution inférieure mais permet d'acquérir une très large gamme spectrale en une seule acquisition.

i. Le spectromètre Sopra

Le spectromètre de marque Sopra qui a été utilisé pour réaliser le diagnostic du plasma est un spectromètre de type Ebert vertical travaillant dans le second ordre [145]. Il dispose d'un miroir sphérique de 2 m de distance focale qui est utilisé deux fois, dans un premier temps pour assurer la collimation de l'image de la fente sur le réseau, puis pour focaliser l'image du spectre sur le détecteur. La largeur spectrale observable dépend de la longueur d'onde étudiée : elle varie de 2,4 nm pour 250 nm (limite inférieure du spectromètre) à 1,1 nm pour 750 nm (limite supérieure)

dans le second ordre. La résolution est donc plus importante pour les longueurs d'onde élevées (de 0.195 nm/mm à 0.0896 nm/mm sur la fente de sortie).

C'est la rotation du réseau, de 1200 traits/mm, qui permet de faire varier la longueur d'onde visible sur la fente de sortie du spectromètre. Elle est assurée par un moteur asynchrone, commandé manuellement, et relié à un compteur, précis à 0,1 nm, permettant un affichage direct de la longueur d'onde, en angströms. Un étalonnage en longueur d'onde du spectromètre a été réalisé à l'aide de diverses lampes spectrales basse-pression.

Le réseau utilisé (1200 traits/mm) est blasé dans le second ordre, mais il est possible d'observer des raies issues des autres ordres. Pour éviter toute incertitude sur l'identification d'une raie, des filtres optiques sont disposés devant la fente d'entrée du spectromètre, sur un support rotatif permettant de passer aisément et de façon reproductible de l'un à l'autre. Pour le domaine spectral observé, nous avons utilisé des filtres de marque MELLES GRIOT référence HR20a ($240 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$, UV), BG12 ($350 \text{ nm} < \lambda < 470 \text{ nm}$, bleu), GG495 ($\lambda > 495 \text{ nm}$, jaune), OG590 ($\lambda > 585 \text{ nm}$, rouge) et M.T.O. H476a ($380 \text{ nm} < \lambda < 620 \text{ nm}$, vert).

La largeur de la fente d'entrée (de l'ordre de $20 \mu\text{m}$) est réglée à l'aide d'une vis micrométrique (graduations à $10 \mu\text{m}$ près) et mesurée avec précision par diffraction à l'aide d'un laser monté 'en inverse' à proximité de la fente de sortie du spectromètre. Ce laser permet également d'aligner l'ensemble du dispositif optique.

Le détecteur utilisé est une caméra de type OMA IV intensifié, de modèle Pi-Max, fabriquée par Princeton Instruments et pilotée par le logiciel Winspec. La matrice active est un capteur CCD (Thompson) de 512×512 pixels. La taille effective des pixels est de $24 \times 24 \mu\text{m}$ (pour une taille active de $19 \times 19 \mu\text{m}$) ce qui assure un champ de vision de $12,4 \times 12,4 \text{ mm}$ ($17,5 \text{ mm}$ en diagonale). La résolution spectrale de l'ensemble du dispositif d'acquisition, mesurée expérimentalement à l'aide de lampes spectrales basse-pression, s'étend de 0.00469 nm par pixel à $\lambda = 275 \text{ nm}$, à 0.00215 nm/pixel à $\lambda = 750 \text{ nm}$ [Cf. Figure V.3]

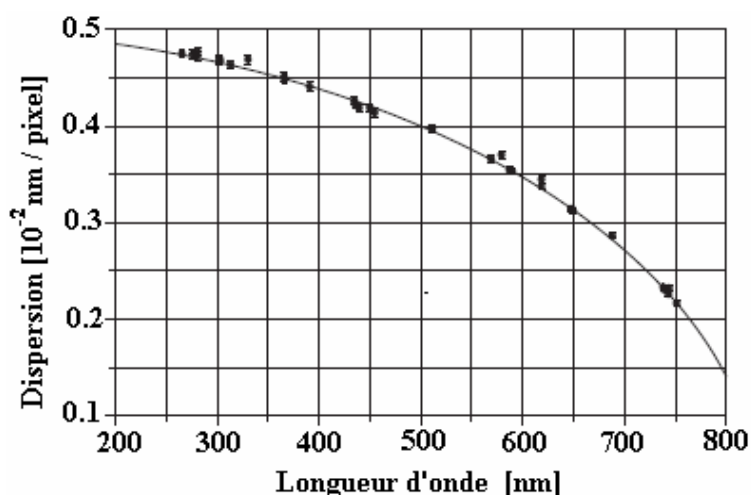


Figure V.3 : Dispersion du système optique équipé de la caméra intensifiée PI-MAX (512×512 pixels)

La sensibilité du détecteur s'étend du proche UV (200 nm) jusqu'au proche infrarouge (800 nm). La dépendance de la sensibilité de la photocathode est indiquée sur la Figure V.4. Pour limiter le bruit thermique, la caméra est refroidie à -20°C au moyen d'un élément Peltier et d'un ventilateur.

L'ensemble du dispositif est calibré en énergie en utilisant une lampe-étalon à ruban de tungstène, dont l'émissivité est connue, placée à l'endroit de la torche de soudage.

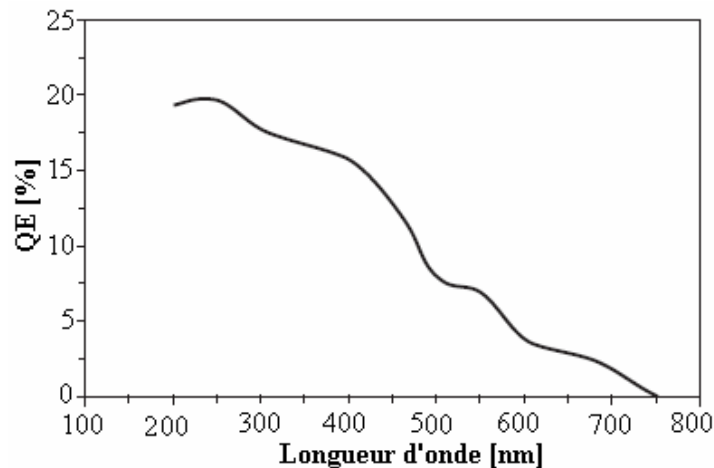


Figure V.4 : Sensibilité spectrale de la photocathode de la caméra intensifiée PI-MAX (512x512 pixels)

ii. Le spectromètre Méchelle

La largeur spectrale mesurable avec le premier spectromètre Sopra est réduite, environ 2 nm pour une longueur d'onde de 400 nm. Pour acquérir l'ensemble du spectre (visible, proche UV et proche IR), il serait nécessaire de réaliser plusieurs centaines de mesures. Outre le temps important associé aux mesures, cela poserait le problème de leur reproductibilité exacte. En effet si les paramètres utilisés pour le diagnostic principal (largeur des raies) est suffisamment stable dans le temps, il n'en n'est pas toujours de même pour l'intensité lumineuse émise qui peut connaître des fluctuations importantes.

Pour acquérir l'ensemble du spectre, il existe la possibilité d'effectuer la mesure avec un spectromètre de faible résolution, permettant de balayer rapidement le du spectre du proche UV au proche IR. Cependant le spectre de soudage est très riche (le fer possède notamment de nombreuses raies intenses) et on obtient principalement des pics d'intensité correspondant au groupement de plusieurs raies proches [98, 99]. Il est donc difficile d'identifier les raies si la résolution est trop basse.

C'est pourquoi un autre type de spectromètre permettant d'observer l'ensemble du spectre avec une résolution acceptable a été utilisé. Il s'agit d'un spectromètre Méchelle 5000, fabriqué par Andor Technology. Sa focale f est de 195 mm pour une ouverture égale à $f/7$. Equipé d'un réseau multi-échelle et d'un prisme, associé à une matrice de capteurs 2D, ce spectromètre utilise les différents ordres de diffraction (plus d'une centaine) pour mesurer l'ensemble du spectre. Les ordres successifs sont décalés en hauteur et apparaissent les uns au-dessus des autres sur la matrice du capteur CCD. La résolution spectrale $\lambda/\Delta\lambda$ vaut 5000 (pour une largeur totale à mi-hauteur de 3 pixels) soit 0,04 nm à 200 nm ou 0,1 nm à 500 nm [Cf. Figure V.5]

Le logiciel I-Star associé au capteur, rassemble ensuite les différents spectres en les plaçant bout à bout de manière à avoir un spectre similaire à celui fourni par un spectromètre classique. Le modèle utilisé possède une étendue spectrale de 200 à 950 nm. L'absence d'éléments mobiles (il n'est pas nécessaire de faire tourner le réseau puisque l'ensemble du spectre est acquis en une seule fois) rend le dispositif plus précis et plus robuste.

La fente d'entrée du spectromètre a pour dimension $50 \times 50 \mu\text{m}$. Comme la dispersion utilise les deux dimensions de la matrice, la mesure réalisée correspond à une étude ponctuelle de la source lumineuse. L'entrée du spectromètre est équipée d'un support SMA pour fibre optique. Il est ainsi possible d'étudier sur une large étendue spectrale les raies des éléments présents dans le plasma, sous réserve que la plage de longueur d'onde transmise par la fibre optique (et par le montage optique éventuellement placé en amont) soit suffisamment étendue, au moins égale à celle couverte

par le spectromètre. La résolution est cependant inférieure au premier spectromètre, ce qui rend impossible son utilisation pour l'analyse des raies spectrales.

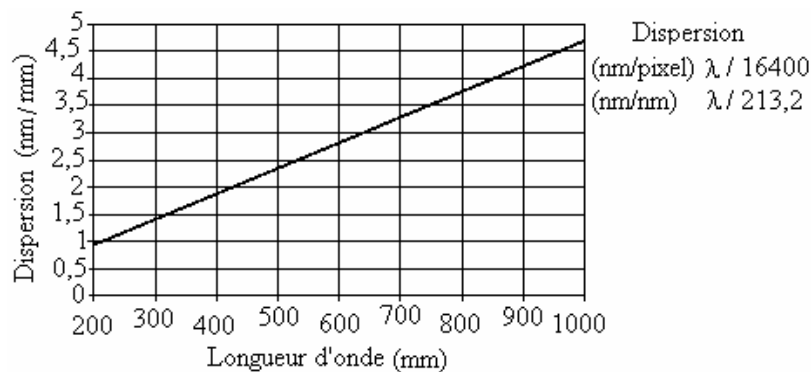


Figure V.5 : Dispersion du spectromètre Méchelle 5000

Le détecteur associé au spectromètre Méchelle est une caméra CCD ISTAR DH 734 intensifiée (grandissement 1.1) de 1024 × 1024 pixels de 13×13 microns. La surface active mesure donc 13,3 × 13,3 mm ; elle est sensible dans la gamme spectrale 115 à 920 nm. Sa linéarité (pourcentage de déviation par rapport à une approximation linéaire) est de 1%. L'intensificateur, de type W/ HR/P43 a un diamètre $d = 16$ mm ; il est sensible dans la gamme spectrale 180 à 850 nm [Cf. Figure V.6]. Pour une longueur d'onde de 440 nm, l'efficacité quantique de l'intensificateur à température ambiante est de 18%.

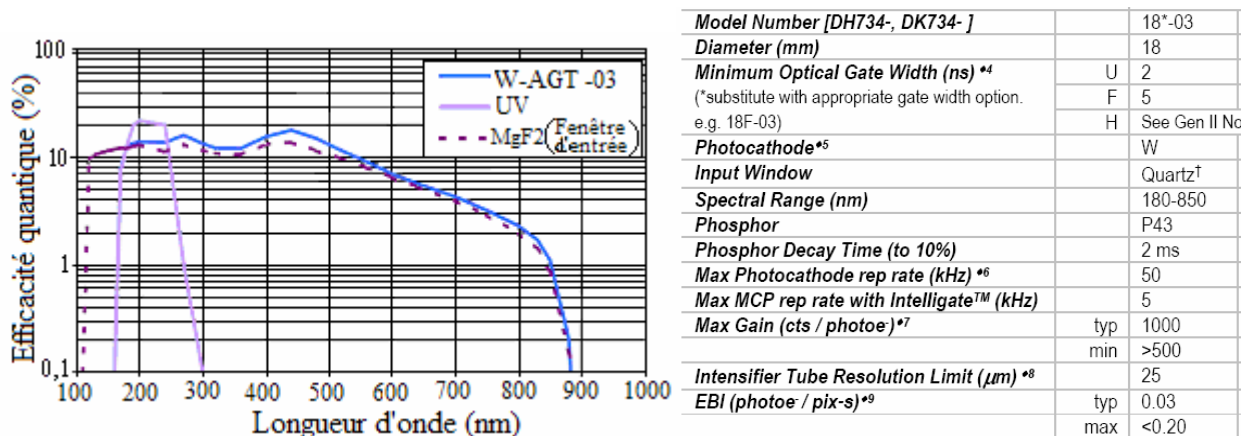


Figure V.6 : Caractéristiques de l'amplificateur du détecteur ISTAR DH 734-18F-03

Le spectromètre est calibré en longueur d'onde au moyen d'une lampe spectrale (Ar-Hg par exemple) équipée d'une sortie permettant de raccorder la fibre optique. Pour le calibrage en énergie, la même lampe au tungstène peut être utilisée, mais un boîtier spécifique, également équipé d'une sortie pour fibre optique, est disponible. Il dispose de deux lampes de calibrage, une lampe au deutérium pour calibrer les basses longueurs d'onde (< 400 nm) et une lampe halogène pour les longueurs d'ondes les plus élevées.

5.2. Le montage optique

Avec le spectromètre Méchelle, un montage optique simple est suffisant pour étudier la lumière émise par l'arc. Une lentille achromatique est placée de manière à former l'image de l'arc dans le plan où le support de la fibre optique reliée au spectromètre est placé. Si on choisit d'étudier la lumière globale émise par l'arc un faible grandissement est suffisant. Par contre si on choisit de mesurer la lumière émise par une zone particulière un grandissement plus important est nécessaire pour obtenir une résolution suffisante. Les zones étudiées peuvent être celles proche de l'anode, proche de la cathode, proche du centre de la colonne ou en périphérie. Pour plus de commodité, la

lentille est fixe et le support de la fibre optique est fixé sur des tables de déplacement micrométriques. En prenant un point de repère (par exemple l'extrémité du fil-électrode coupée après le dernier essai) il est possible de connaître la position visée dans le plasma. La résolution augmente avec le grandissement et diminue avec le diamètre de la fibre optique utilisée.

Pour réaliser le diagnostic du plasma, avec le spectromètre de marque SOPRA, il est nécessaire d'avoir une résolution spatiale suffisante : elle va dépendre du grandissement de l'image de la colonne d'arc sur la fente d'entrée du spectromètre, et des dimensions du détecteur utilisé (taille des pixels). La hauteur de la fente d'entrée détermine l'étendue mesurable, sous réserve que l'ouverture optique du montage optique soit compatible avec celle du spectromètre et que toute la lumière entrant par la fente soit diffractée vers le détecteur. Avec le montage optique utilisé, la résolution spatiale est typiquement de $62,5 \mu\text{m}$ par pixel.

La fente d'entrée du spectromètre est verticale, alors que le diagnostic du plasma nécessite d'enregistrer une section horizontale de la colonne de plasma pour pouvoir ensuite réaliser l'inversion d'Abel. La rotation de 90° de l'image de la colonne de plasma est réalisée au moyen d'un prisme de Dove. Ce prisme dévie la lumière en fonction de sa position angulaire par rapport à son axe optique. La déviation est nulle lorsque les deux faces rectangulaires sont verticales et augmente ensuite d'un angle $2a$ pour une rotation d'un angle a . Ainsi pour obtenir une rotation à 90° il faut tourner le prisme d'un angle de 45° par rapport à la position donnant une déviation nulle. La Figure V.7 montre l'exemple du prisme tourné à 90° , l'image (la lettre « R ») est retournée à 180° .

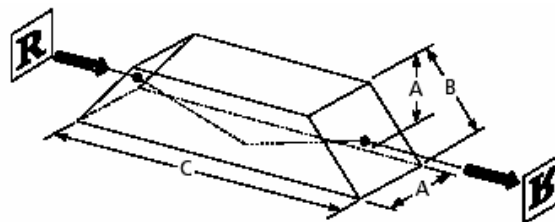


Figure V.7 : Schéma de la déviation des faisceaux lumineux par un prisme de Dove

Pour que le trajet de la lumière corresponde à celui représenté plus haut, il est nécessaire que les faisceaux soient proches de l'axe optique. La taille de la zone observée étant de 1 à 2 cm, cela impose de réduire l'image au niveau du prisme, dont la largeur est d'environ 1 cm. Pour que le grandissement global ne soit pas trop faible, il est ensuite nécessaire de ré-agrandir l'image avant que la lumière n'atteigne la fente d'entrée du spectromètre.

Le montage optique doit donc comporter deux éléments focalisant. Pour réduire l'absorption de la lumière, et comme il est nécessaire d'ajuster la hauteur visée dans l'arc à la position de la fente d'entrée du spectromètre, le montage est entièrement réalisé avec des miroirs. Le schéma d'ensemble est donné sur la Figure V.1., page 85 et la Figure V.9 page 100. Selon leur fonction, on peut distinguer trois groupes de miroirs : les miroirs d'ajustement de la hauteur (M_2 et M_3), les miroirs de focalisation (S_1 et S_2) et les miroirs de renvoi (M_1 , M_4 , M_5 , M_6 et M_7).

Les miroirs M_2 et M_3 sont montés à 45° sur un support avec un écartement tel qu'il permette de compenser la différence de hauteur entre la colonne de plasma et la fente d'entrée du spectromètre [Cf. Figure V.8].

Une vis micrométrique permet de déplacer l'ensemble de ces deux miroirs pour faire varier la hauteur visée dans l'arc. Compte tenu du chemin optique, pour 1 mm de déplacement la hauteur est modifiée de 2 mm. Pour plus de précision, un étalonnage est réalisé pour vérifier la position exacte visée. Le laser d'alignement du spectromètre est allumé et forme une tache sur le fil-électrode, amené au contact de la pièce. Une macrophotographie, réalisée avec un appareil photographique numérique, permet de mesurer avec une bonne précision (1 pixel pour $20 \mu\text{m}$) la hauteur

considérée. Pour une recherche rapide d'une hauteur particulière, on utilise des cales (1 mm d'épaisseur) pour obtenir une première valeur approchée de la hauteur, avant la mesure précise.

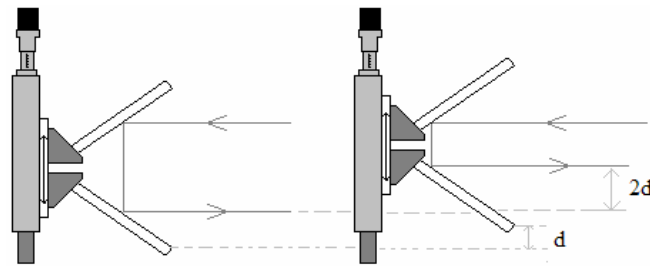


Figure V.8 : Sélection de la hauteur de visée

Avant d'arriver sur ces deux miroirs, la lumière est captée par le premier miroir M_1 . Elle est ensuite déviée par le miroir M_4 avant d'atteindre le premier miroir sphérique S_1 qui a pour fonction de former une image réduite ($\gamma = 0,2$) au niveau du prisme de Dove, après renvois par le miroir M_5 . Cette image constitue l'objet du deuxième miroir sphérique S_2 (après renvois par le miroir M_6) qui agrandit l'image d'un facteur 2. Le grandissement total du montage optique est donc de 0,4. L'image est finalement dirigée sur la fente d'entrée du spectromètre par le miroir de renvois M_7 . Un diaphragme, placé entre le miroir de renvoi M_4 et le premier miroir sphérique S_1 , permet d'éliminer les rayons lumineux qui seraient trop éloignés de l'axe optique. [Cf. Figure V.9].

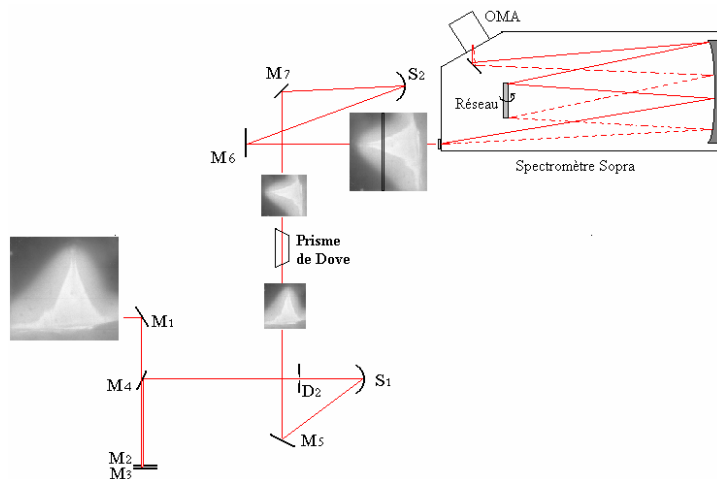


Figure V.9 : Chemin optique du montage utilisé pour le diagnostic du plasma

5.3. Remarque importante

Il faut noter que, pour réaliser cette étude, nous avons admis que la situation dans l'arc est répétitive pour chacun procédé, sous réserve que tous les paramètres électriques et le mélange de gaz soient identiques. Malheureusement, nous ne pouvons pas négliger l'influence des fluctuations (le cœur d'arc est quasiment stable, mais pas la couche extérieure, notamment en régime pulvérisation axiale), le manque de symétrie de la colonne, l'influence du métal liquide qui traverse la région d'étude spectroscopique, et le déplacement de la cathode. Par ailleurs, la comparaison entre les résultats obtenus à une même hauteur h dans la colonne d'arc mais pour des gaz différents, n'est pas complètement justifiée en raison de la variation de longueur de l'arc et de l'épaisseur du cordon de soudure (avec CO_2 le cordon est moins épais - la tension superficielle diminue).

Pour ces raisons, mais aussi pour évaluer l'influence du traitement des données expérimentales et vérifier la validité des méthodes employées, il est nécessaire d'effectuer une analyse statistique détaillée des erreurs avant d'interpréter complètement les résultats obtenus.

VI - VISUALISATION DE L'ARC

1. INTRODUCTION

Pour caractériser le régime de transfert, les soudeurs se basent notamment sur l'observation de l'arc. A l'œil nu, à travers le masque qui élimine principalement la gamme UV du spectre, il est possible de distinguer les parties centrale et périphérique de l'arc. La goutte se formant à l'extrémité de l'électrode n'est visible que lorsqu'elle est de taille importante et que la fréquence de détachement est faible. L'utilisation d'une caméra permet d'une part d'archiver les images obtenues et d'autre part de sélectionner, en utilisant différents filtres, la longueur d'onde et l'intensité de la lumière enregistrée. Une très haute vitesse d'acquisition permet d'étudier les phénomènes rapides comme le détachement des gouttes ou leurs oscillations à l'extrémité de l'anode.

Dans la majorité des études publiées, l'observation du procédé se fait en supprimant la lumière de l'arc, car l'objectif est d'étudier le détachement des gouttes. Au contraire, le dispositif que nous avons utilisé est destiné avant tout à étudier la lumière de l'arc pour visualiser la forme du plasma. Néanmoins, en choisissant correctement le contraste, il est possible d'observer également le détachement des gouttes et le mode d'accrochage de l'arc sur l'extrémité de l'électrode. Il est ainsi possible d'étudier plusieurs critères (géométrie de l'arc, taille et fréquence de détachement des gouttes) pour caractériser le transfert du métal.

Avec le filtre interférentiel bleu utilisé, les zones les plus lumineuses des images obtenues correspondent aux régions où les vapeurs métalliques sont les plus denses ; cette répartition est confirmée par les mesures spectroscopiques (voir chapitre VIII). Leur conductivité étant plus élevée que le reste du plasma, on peut supposer que la densité de courant est plus grande dans la zone où leur concentration est la plus forte. La visualisation de la forme de l'arc permet donc d'obtenir une information sur la géométrie des lignes de courant. Ce résultat est particulièrement important à l'anode, à l'interface entre le plasma et l'électrode. En effet la forme des lignes de courant influence directement sur la force de Lorentz qui est l'une des principales actions gouvernant le détachement des gouttes. L'étude de l'accrochage de l'arc avec un fort grossissement et une grande vitesse d'acquisition permet donc d'améliorer la compréhension des phénomènes liés au transfert de métal.

L'étude de la surface de l'électrode permet de compléter, par une mesure en temps réel, l'observation au microscope de la microstructure de l'électrode dont les résultats sont détaillés dans le chapitre VII.

La caractérisation du régime de transfert constitue le principal objectif de l'étude de l'arc par imagerie rapide. Les résultats de l'étude de l'influence du courant et de la composition du gaz de protection sur le plasma et l'électrode ont été présentés dans la thèse de S. Zielinska [1]. Les différentes configurations obtenues ont été associées aux différents régimes de transfert, pour le fil de référence 70 S. Pour ce qui est de la transition entre le régime de pulvérisation axiale et le régime globulaire, les principaux résultats concernant l'arc de soudage en polarité inverse sont les suivants :

- En régime de pulvérisation axiale, une zone lumineuse, donc riche en vapeurs métalliques, est nettement définie au centre de la colonne. Elle présente une forme en cône, dont la pointe s'accroche à l'extrémité de l'électrode. Celle-ci est effilée et le métal se détache sous forme de petites gouttelettes qui sont transférées à travers la colonne d'arc vers la plaque.
- En régime globulaire, les vapeurs métalliques et le gaz de protection sont mélangés de manière plus homogène : la forme globale de l'arc est celle d'une cloche accrochée "au-dessus" de la zone fondue. Celle-ci forme une "goutte" dont le diamètre peut être plus important que celui du fil. Elle est entourée par le plasma.

L'observation du plasma permet, outre la stabilité de l'arc, de déterminer ses différentes caractéristiques géométriques. En particulier, la longueur de l'arc présente un intérêt particulier, car

ce paramètre est directement lié à la tension. Or cette dernière peut être facilement mesurée dans le cas d'un procédé industriel et peut être également modifiée par la consigne du générateur. En complément de l'étude de la transition, les résultats concernant l'arc (longueur, mode de transfert) sont donc corrélés avec l'évolution de la tension.

Il a ainsi été montré par S.Zielinska [1] que pour un courant de 330 A, la tension d'arc diminuait fortement dès l'ajout d'une faible quantité de CO₂ (moins de 5%) dans l'argon de protection, avant d'augmenter régulièrement (environ 40 V pour 20% de CO₂ par exemple). Le taux de CO₂ pour lequel la valeur de la tension atteignait sa valeur sous argon pur, était proche de celui correspondant à la transition entre le régime de pulvérisation axiale et le régime globulaire.

Ce comportement a été vérifié dans un premier temps pour le fil de référence 70 S pour d'autres courants, puis étudié pour les autres fils. L'évolution de la tension est également corrélée avec l'évolution de la fréquence de détachement des gouttes. Ce paramètre, qui est utilisé comme l'un des critères permettant de caractériser le régime (globulaire ou pulvérisation axiale), fournit plus généralement une information importante sur le processus de soudage. En effet, du point de vue industriel, il est utile de connaître la quantité de métal déposé sur les pièces à souder par unité de temps, et cette quantité est liée à la fréquence de détachement des gouttes transférées aux pièces.

2. ETUDE DES DIFFERENTS REGIMES DE SOUDAGE

2.1. Procédure

Les observations réalisées avec la caméra MVS-135 sont faites dans le but d'obtenir une vue globale de l'arc. Il est donc nécessaire de visualiser tous les niveaux d'intensité lumineuse. Dans le cas de la pulvérisation axiale, en particulier, il est nécessaire de mettre en évidence deux zones du plasma, la zone centrale et la zone périphérique. Cependant compte tenu de la résolution (environ 100 µm par pixel) si les images obtenues permettent d'avoir une bonne vue d'ensemble du plasma (zone de 13 à 14 mm de côté, pour une fréquence d'acquisition de 109 images par seconde), elles fournissent par contre peu d'information sur l'accrochage de l'arc. Il est seulement possible de relever la position de la veine de métal liquide formant l'extrémité de l'électrode. [Cf. Figure VI.1] dans le cas du régime de pulvérisation axiale.

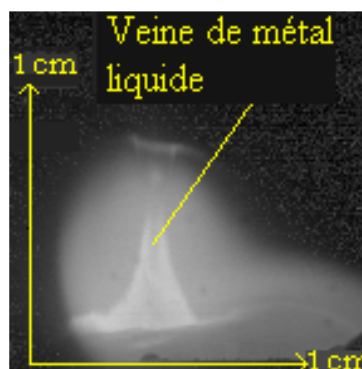


Figure VI.1 : Observation de l'accrochage de l'arc avec la caméra MVS 135

La vitesse d'acquisition maximale de cette caméra (350 images/s, pour une image suffisamment détaillée) est adaptée pour étudier le détachement des gouttes en régime globulaire (fréquence caractéristique de 100 à 200 Hz). Elle est en revanche insuffisante pour observer la pulvérisation axiale (fréquence de l'ordre de 600 Hz sous argon pur). La caméra Fastcam 1024-PCI, qui permet une résolution et une vitesse d'acquisition plus importante, a donc été employée pour l'observation de l'accrochage de l'arc. Pour visualiser le centre du plasma et la veine de métal, très lumineux, il est nécessaire de choisir un temps d'obturation court (1/30000 s) ; dès lors les régions les moins lumineuses de la colonne de plasma et le haut du fil qui n'est pas éclairé par l'arc apparaissent moins distinctement.

Des observations utilisant un éclairage par diode laser sont réalisées pour compléter l'étude de la fusion du fil.

Les études publiées sont réalisées, en majorité, pour des vitesses de 1000 à 4500 images par seconde : [75], [76], [81] et [103] : 1000 images.s⁻¹ ; [40] : 2000 images.s⁻¹, ; [86] et [105] : 3000 images.s⁻¹ ; [85] : 3700 images.s⁻¹ ; [33] et [36] : 4000 images.s⁻¹ ; et [9] et [78] : 4500 images.s⁻¹. En ce qui concerne ce travail, la fréquence d'acquisition a été choisie à 3000 images par secondes avec une taille maximale de la zone observée de 384×752 pixels. Avec le grandissement utilisé (1 pixel ⇔ 10 μm), l'image enregistrée correspond à une zone de 3,8 mm par 7,5 mm. Le niveau de détail ainsi obtenu (précision à 0,01 mm) est plus important que dans la majorité des autres études.

Les différents fils étudiés présentent des caractéristiques similaires en ce qui concerne le régime de transfert, quelle que soit le type étudié (fils fourré ou massif). La description des régimes est donc détaillée pour un seul fil de chaque groupe : le fil massif de référence 70 S, et le fil fourré G002. La mesure précise des caractéristiques géométriques de l'extrémité de l'électrode est utilisée évaluer le poids et la tension de surface agissant sur la goutte. L'évaluation de la surface en contact avec le plasma permet de connaître la densité de courant sortant de l'électrode.

2.2. Cas de la pulvérisation axiale

L'étude est menée pour un fonctionnement sous argon pur sous un courant de 330 ampères. Ces conditions déterminent un régime stable qui est bien représentatif du transfert par pulvérisation axiale.

i. Etude des fils massifs

Dans la majorité des modèles de l'arc de soudage traitant de la formation de la goutte ([35], [36], [37], [38], [39]), celle-ci est supposée se former au bout du fil-électrode. Cette disposition est représentative du régime globulaire qui est détaillé dans le paragraphe suivant. Dans le cas de la pulvérisation axiale, la géométrie est plus complexe car il se produit une réduction du diamètre du fil. Une telle configuration est plus délicate à modéliser et les auteurs considèrent plutôt un cylindre de surface équivalente [34]. Il est donc particulièrement intéressant de connaître plus en détail la géométrie de l'électrode.

L'éclairage du fil par le laser permet de mettre en évidence plusieurs tronçons [Cf. Figure VI.2] dont les tailles varient au cours du temps, en particulier lors du détachement d'une goutte. Les dimensions doivent donc être mesurées sur plusieurs images consécutives correspondant au détachement d'au moins une goutte. Pour plus de précision on considère en fait trois gouttes.

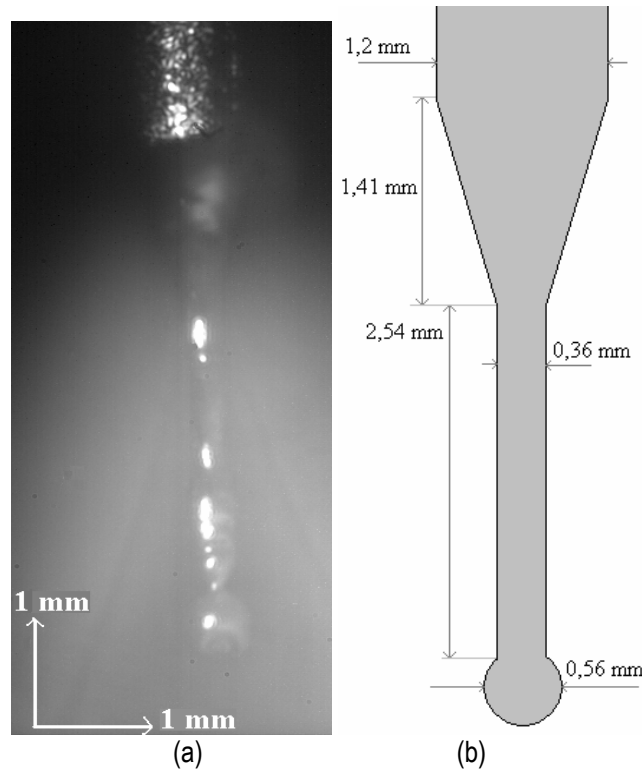


Figure VI.2 : Morphologie de l'extrémité de l'électrode

(a) : photographie avec le laser d'éclairage ; (b) représentation schématique.

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $I_{arc} = 330$ A ; $V_{fil} 9$ m/mn ; argon pur ; $D_g = 20$ l/mn]

- En partant du fil non fondu et en descendant vers le bain de fusion, le premier tronçon observé, de surface S_1 , est de section conique, avec une réduction du diamètre de l'électrode. Cette réduction débute à la limite entre le fil solide et le fil fondu, mais cela n'implique pas nécessairement que le métal soit liquide jusqu'au centre de l'électrode dès le début du cône. Selon Waszink et Van den Heuvel [34], l'extrémité de l'électrode solide forme un cône lui-même recouvert par une fine couche de métal fondu d'une épaisseur de 0,1 mm [Cf. Figure VI.3].

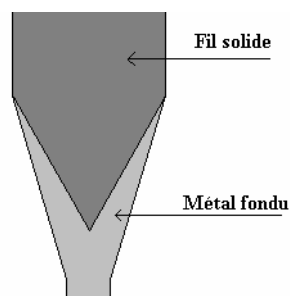


Figure VI.3 : Répartition possible du métal fondu et du métal solide

- Dans tous les cas, l'interface entre le plasma et l'électrode est assurée à ce niveau par un matériau sous forme liquide. La longueur du tronçon cône est de $(1,41 \pm 0,01)$ mm ; le grand diamètre est celui du fil (1,2 mm) et le diamètre le plus faible vaut $(0,36 \pm 0,01)$ mm, d'où une surface $S_1 = (3,61 \pm 0,01)$ mm². Au cours du temps, cette section évolue peu et conserve sa stabilité même lors du détachement des gouttes.
- Le second tronçon observé (de surface S_2) est une veine de métal liquide quasiment cylindrique d'une longueur moyenne de $(2,54 \pm 0,01)$ mm pour un diamètre typique de $(0,36 \pm 0,01)$ mm. La surface correspondante vaut $S_2 = (2,87 \pm 0,01)$ mm². Néanmoins, le diamètre fluctue au cours du temps, et peut être réduit jusqu'à environ deux tiers de sa valeur

normale ($\approx 0,22$ mm). L'hypothèse la plus vraisemblable est que cette striction résulte de l'effet des forces électromagnétiques lié au passage du courant

La longueur de la veine liquide varie également : elle augmente progressivement, puis est considérablement diminuée (parfois de moitié) au moment du détachement de la "goutte".

L'importance de la surface de ce tronçon cylindrique justifie l'approximation couramment réalisée d'une électrode cylindrique.

- Le dernier tronçon, associé à une surface S_3 (représentée en gris foncé sur la Figure VI.4), est constitué par la goutte proprement dite, qui se présente le plus souvent sous la forme d'un simple renflement. Son diamètre moyen est de l'ordre de $(0,56 \pm 0,01)$ mm, mais cette valeur évolue au cours de la croissance de la goutte. En particulier, peu après son détachement il est difficile de faire la distinction entre la nouvelle goutte et la veine cylindrique de métal liquide.

Les gouttes se détachent en général avec régularité, mais il peut arriver que l'extrémité de la veine de métal liquide se rompe plus haut, projetant une quantité de métal plus importante.

Pour déterminer la surface Σ_3 de la goutte en contact avec le plasma, il faut retrancher l'aire correspondant à la jonction avec la veine de métal liquide, en d'autres termes celle de la calotte sphérique de diamètre équivalent à celui du fil ; tous calculs faits, on trouve $\Sigma_3 = (0,93 \pm 0,01)$ mm².

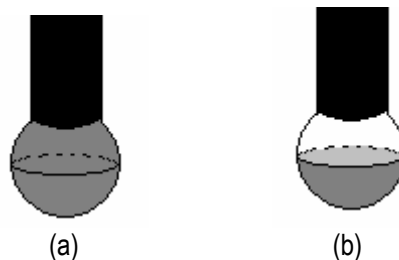


Figure VI.4 : Surface de la goutte en contact avec le plasma
(a) : surface totale ; (b) : surface en regard avec la cathode.

Le volume associé à la goutte $\mathcal{V}_{g,3} = (0,09 \pm 0,01)$ mm³ est obtenu en déterminant le volume de la sphère de diamètre équivalent. Cela revient à attribuer à la goutte la portion de métal appartenant à la veine de métal cylindrique, ce qui est vérifié lors du détachement de l'extrémité.

La détermination de la masse de la goutte implique de connaître la densité du métal liquide. Cette valeur est difficile à connaître, car elle dépend de la température et de la composition chimique exacte du métal. L'étude a posteriori au microscope électronique à balayage montre que, en première approximation, la goutte reste essentiellement composée de fer. Sa température reste plus difficile à évaluer, d'autant que le rayonnement même du plasma environnant empêche sa mesure par thermométrie infrarouge. J. Hu et H.L. Tsai [39] ont calculé la distribution de température de la goutte. Pour une première approximation nous avons pris une valeur moyenne de 2000 K. Pour cette température la densité du fer est de 6,9 [146], nous obtenons donc à partir du volume de la goutte une masse de 0,63 mg, ce qui correspond (en prenant $g = 9,81$ m.s⁻²) à un poids de 6,2 μ N.

La mesure de la force due à la tension de surface selon la méthode présentée au chapitre II (2.2i.), équation (19) donne une valeur de l'ordre de 5,5 mN en utilisant pour la tension de surface, pour la même température de 2000 K, une valeur de 1,82 mN/m. [147]

Enfin, la surface de la goutte directement en regard avec la cathode est obtenue en considérant la demi sphère associée à la goutte : $\Sigma_3' = (0,49 \pm 0,01)$ mm² [Cf. Figure VI.4]

L'observation de l'arc avec le filtre interférentiel bleu centré à 469 nm permet de repérer les positions des différentes régions du plasma et de les associer à chacune des sections identifiées précédemment [Cf. Figure VI.5]. Dans ces conditions, la caméra MVS 135 permet de mettre clairement en évidence deux zones du plasma de luminosités très différentes, alors que la caméra

Fastcam fait apparaître la zone centrale la plus lumineuse du plasma et la veine de métal liquide, au détriment de la zone périphérique du plasma. Le tronçon conique du fil de surface S_1 , qui est entourée d'un plasma peu lumineux, est difficilement observable sur ces images.

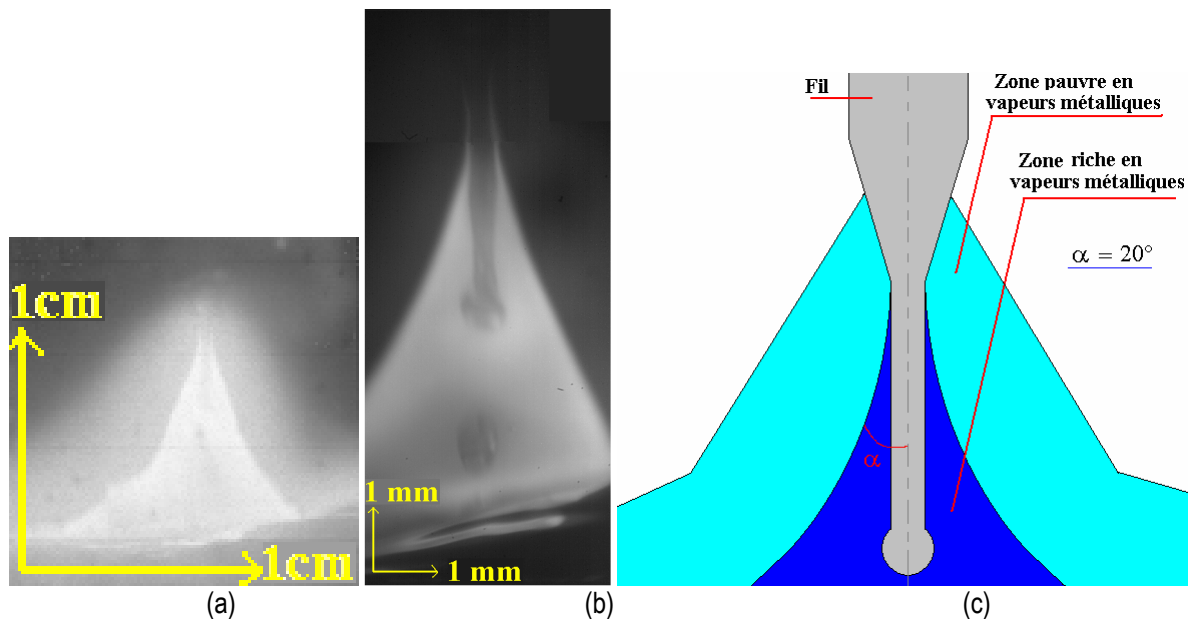


Figure VI.5 : Forme de l'arc en pulvérisation axiale
 (a) caméra MVS 135 (filtre bleu) ; (b) caméra Fastcam (filtre bleu); (c) représentation schématique
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $I_{arc} = 330$ A ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; argon pur ; $D_g = 20$ l/mn]

On constate que

- La veine de métal liquide et la goutte (les surfaces S_2 et Σ_3 définies précédemment) sont entourées par un plasma lumineux, riche en vapeurs métalliques. C'est au milieu de cette zone qu'a lieu le détachement des gouttes.
- La limite de séparation entre la zone conductrice du plasma et sa partie périphérique plus sombre, fait un angle $\alpha = 20^\circ$ par rapport à l'axe du fil [Cf. Figure VI.5_c] : on peut supposer que cet angle est bien représentatif du passage des lignes de courant entre l'électrode et le milieu plasmagène.
- Le tronçon de surface S_1 de l'électrode n'est en contact qu'avec un plasma pauvre en vapeurs métalliques, représenté en bleu ciel sur la Figure VI.5_c. De plus, on peut voir sur la Figure VI.5_a que la zone la plus haute de la colonne de plasma est très peu lumineuse, là où le fil commence à fondre (au début du tronçon conique). On peut donc en déduire que la densité de courant n'est significative qu'à partir d'une certaine distance de cette limite de fusion. Des mesures précises réalisées sur les images enregistrées montrent que les deux tiers seulement de la surface du tronçon de cône sont en regard avec le plasma lumineux. Pour calculer la densité moyenne de courant sortant de l'électrode et entrant dans le plasma, nous avons donc considéré pour le tronçon de cône une surface $\Sigma_1 \approx 0,66 \cdot S_1$. C'est pour représenter cette correction que la limite de la zone bleu ciel sur le schéma de la Figure VI.5_c ne s'étend pas jusqu'à la limite de fusion du fil.

La surface totale en regard avec le plasma vaut donc $\Sigma = 0,66 \cdot S_1 + S_2 + \Sigma_3 = (6,18 \pm 0,01) \text{ mm}^2$. Tous calculs faits, nous trouvons pour nos conditions expérimentales $J \approx (53,34 \pm 0,09) \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.

Pour la modélisation, les auteurs considèrent en général que la conductivité électrique du plasma est constante. Ainsi R.T.Deam, S.W.Simpson et J.Haidar [58] considèrent que le plasma est homogène. Cependant le contraste élevé entre la zone centrale et la zone périphérique observé sur la Figure VI.5_a montre que la densité en vapeurs métalliques est nettement supérieure dans la zone

centrale de l'arc, y modifiant profondément la conductivité électrique du plasma et donc la densité de courant.

Cela conduit à distinguer deux interfaces entre l'anode et le milieu plasmagène : l'une avec la zone conductrice, très « riche » en vapeurs métalliques (au centre de la colonne) ; et l'autre avec le plasma « pauvre », beaucoup moins lumineux [Cf. Tableau VI.1].

Section	Σ_1 : Cône	S_2 : Cylindre	Σ_3 : Goutte
Surface en contact avec le plasma (mm ²)	2,38 ± 0,01	2,87 ± 0,01	0,93 ± 0,01
Interface	Zone « pauvre »		Zone « riche »
Surface interface (mm ²)	2,38 ± 0,01		3,80 ± 0,01
Surface totale (mm ²)	6.18 ± 0,01		

Tableau VI.1 : surface des sections en pulvérisation axiale (argon, I = 330 A), fil massif 70 S
[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; I_{arc} = 330 A ; V_{fil} = 9 m/mn ; argon pur ; D_g = 20 l/mn]

Pour la modélisation, il peut être plus commode de séparer les surfaces selon leur orientation par rapport à la cathode. En particulier si on souhaite réaliser un modèle simplifié constitué uniquement de sections verticales et horizontales [Cf. Figure VI.6], il est important de connaître la section de l'électrode consommable (anode) directement en regard avec l'autre électrode (cathode constituée par la pièce à souder) qui sera assimilée à un plan horizontal. Pour cela on utilise la section $\Sigma_3' = 0,49$ mm² définie plus haut, correspondant à la demi-goutte inférieure. Pour conserver la surface d'échange entre l'anode et le plasma, on définit une surface $\Sigma_2 = 3,31$ mm² correspondant à l'aire de la section cylindrique (interface verticale) à laquelle on ajoute la surface de la partie supérieure de la goutte. La section conique est décomposée en escalier [Cf. Figure VI.6]

Les deux zones du plasma sont alors associées à des conductivités différentes C_1 et C_2 avec $C_2 > C_1$. Le fil peut être modélisé par une troisième zone de conductivité C_0 correspondant à la conductivité du métal. Enfin, pour compléter le modèle il faut associer une conductivité nulle au milieu entourant le fil (gaz isolant non ionisé)..

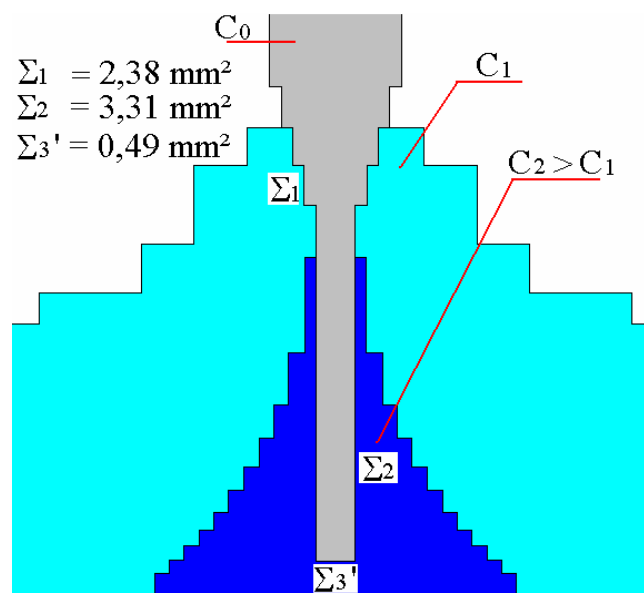


Figure VI.6 : schéma simplifié de l'arc et de l'électrode

ii. Etude des fils fourrés

Le régime de pulvérisation axiale avec fils fourrés présente de grandes similarités avec le mode de transfert correspondant observé pour les fils massifs : le plasma se répartit en deux zones, l'une très lumineuse, quasiment cylindrique, située au centre de l'arc et correspondant à une concentration de vapeurs métalliques élevée, et une zone périphérie plus sombre [Cf. Figure VI.7_a]. La veine de métal liquide est toujours présente, mais l'effilement observé en fil massif (section S_2 ci-dessus) n'existe plus [Cf. Figure VI.7_b et Figure VI.7_c].

La section minimale du fil-anode, correspondant au point d'attachement de la goutte, et le diamètre moyen de cette goutte sont plus importants que dans le cas du fil massif, avec des valeurs respectivement de 0,61 et 0,83 mm contre $(0,36 \pm 0,01)$ et $(0,56 \pm 0,01)$ mm. Le poids de la goutte est alors estimé à $(20,3 \pm 0,1)$ μN , et la force due à la tension de surface est comparable à celle observée en fil massif ($\approx 6,1$ mN).

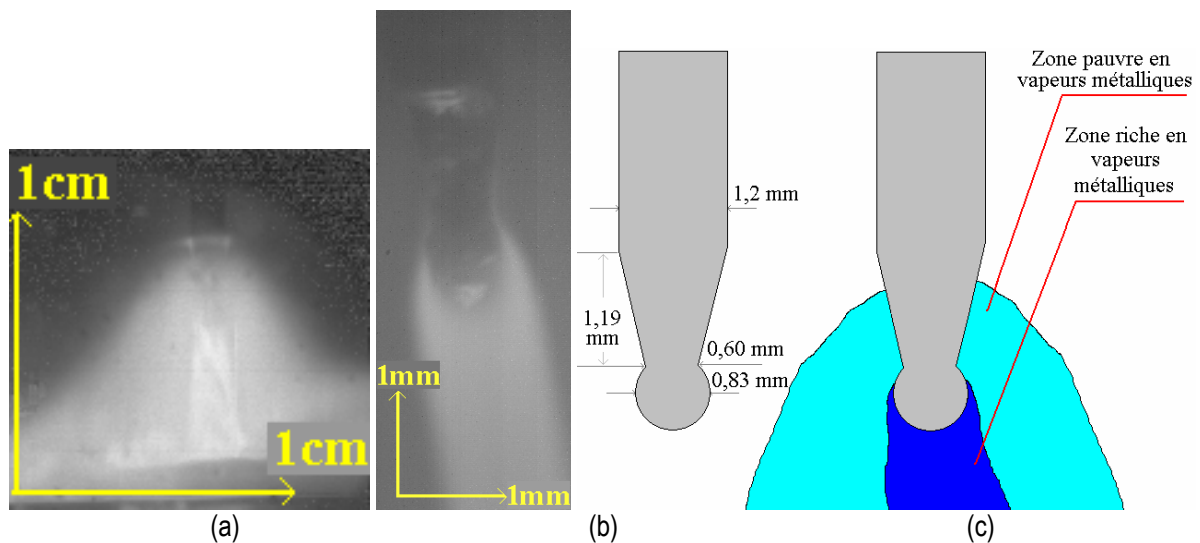


Figure VI.7 : Forme de l'arc en pulvérisation axiale (a) caméra MVS 135 (filtre bleu); (b) caméra Fastcam (filtre bleu); (c) représentation schématique.

[Conditions expérimentales : Fil fourré G002 ; $I_{arc} = 330$ A ; $V_{fil} = 11,4$ m/mn ; argon pur ; $D_g = 20$ l/mn]

Pour la détermination des interfaces électrodes-plasma, on considère respectivement un tronçon cône et une portion de sphère de surfaces respectives $\Sigma_1 = (2,29 \pm 0,01)$ mm² et $\Sigma_3 = (2,00 \pm 0,01)$ mm² [Cf. Tableau VI.2]

Section	Σ_1 : Cône	S_2 : Cylindre	Σ_3 : Goutte
Surface en contact avec le plasma (mm ²)	$2,29 \pm 0,01$	/	$2,00 \pm 0,01$

Interface	Zone « pauvre »	Zone « riche »
Surface interface (mm ²)	$2,29 \pm 0,01$	$2,00 \pm 0,01$
Surface totale (mm ²)	$4,49 \pm 0,01$	

Tableau VI.2 : Surface des différentes sections en pulvérisation axiale, fil fourré G002
[Conditions expérimentales : Fil fourré G002 ; $I_{arc} = 330$ A ; $V_{fil} = 9,8$ m/mn ; argon pur ; $D_g = 20$ l/mn]

2.3. Cas du régime globulaire

Pour le fil massif 70 S, l'étude est réalisée pour un courant de 330 ampères sous argon + 20% de CO₂. Dans ces conditions le régime globulaire est établi de manière permanente et présente une stabilité relative, en terme de reproductibilité des phénomènes observés. Pour les autres fils dont la transition vers le régime globulaire est observée pour des taux de CO₂ plus importants, on retrouve un comportement similaire dès que ce régime est établi de manière permanente.

i. Etude des fils massifs

Dans le cas du régime globulaire, l'extrémité du fil-anode est constituée d'une goutte de diamètre supérieur ou égal à celui du fil. Pour plus de simplicité, les modèles considèrent en général que l'axe de la goutte est le même que celui du fil, mais les observations réalisées montrent cependant une dissymétrie importante, le centre de gravité de la goutte étant généralement hors de l'axe du fil (typiquement, à une distance de l'ordre de 0,3 mm, soit ¼ du diamètre du fil [Cf. Figure VI.8,b]. On n'observe plus de veine de métal liquide, et la surface de l'extrémité du fil-anode peut être décomposée en seulement deux parties S₁ et S₃, respectivement pour le tronçon de cône opposé à la goutte, et la goutte elle-même.

La photographie de la goutte éclairée par le laser et sa représentation schématique sont présentées sur la Figure VI.8. Il faut noter que le départ de la goutte peut avoir lieu dans toutes les directions, mais qu'il ne s'agit pas d'une rotation autour de l'axe du fil : une goutte commençant à se former dans une direction donnée, y restera pendant son grossissement jusqu'à son détachement.

Le fait que la goutte soit décentrée est important pour la détermination des forces électromagnétiques. En effet, il est admis que le transfert dit répulsif, qui conduit à former une goutte remontant vers le fil, implique une composante verticale montante de la force électromagnétique [36, 118]. Si la goutte est systématiquement déportée sur le côté, on peut supposer qu'il existe également une composante radiale de la force électromagnétique. Cette hypothèse est soutenue par le fait que l'observation des enregistrements vidéo montre qu'elle tourne sur elle-même, même si cette rotation peut également être produite par le moment de la force descendante du fil, du fait de l'excentricité.

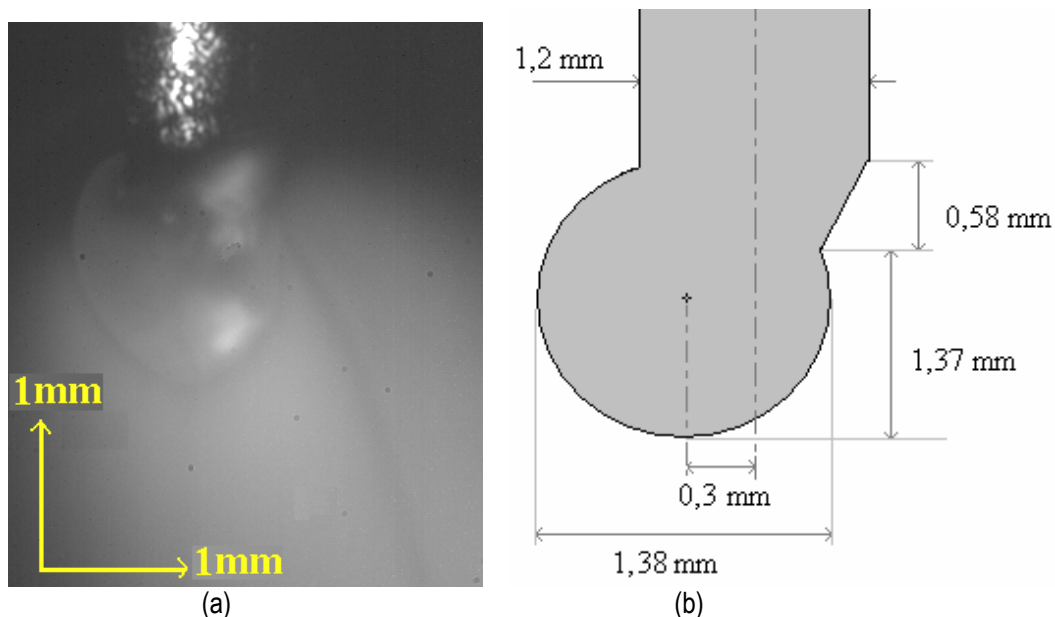


Figure VI.8 : Forme de l'arc en régime globulaire (a) caméra Fastcam, éclairage par le laser ; (b) représentation schématique.

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $I_{arc} = 330$ A ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; Ar + 20% CO₂ ; $D_g = 20$ l/mn]

L'observation de l'arc sous filtre interférentiel bleu montre que la transition entre les deux zones du plasma d'intensités lumineuses différentes, est moins marquée, même si la région centrale reste plus claire que la périphérie de la colonne d'arc.

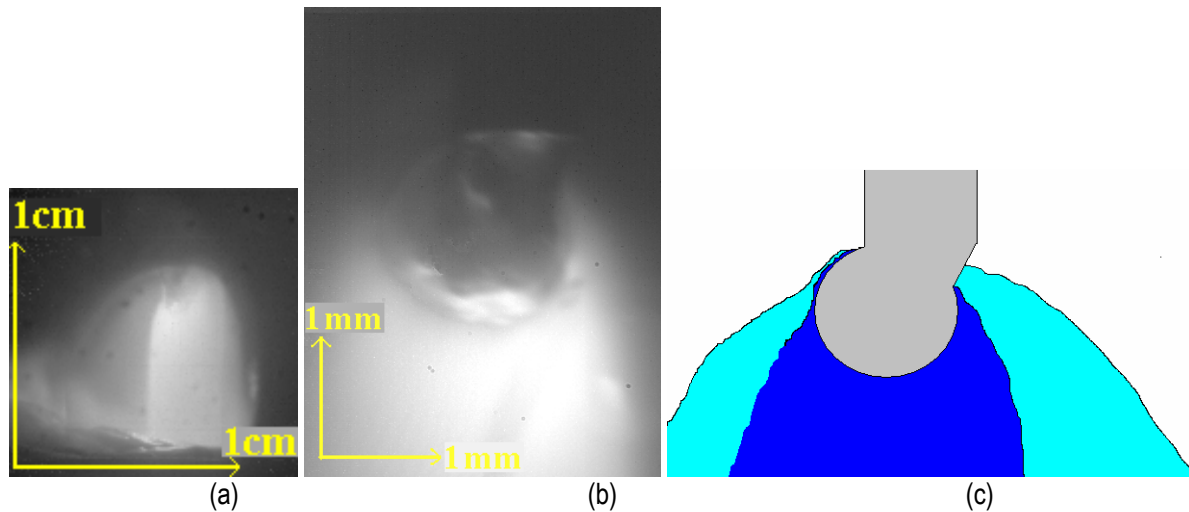


Figure VI.9 : Forme de l'arc en régime globulaire (a) caméra MVS 135 (filtre bleu) ; (b) caméra Fastcam (filtre bleu) ; (c) représentation schématique.

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $I_{arc} = 330$ A ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; Ar + 20% CO₂ ; $D_g = 20$ l/mn]

La surface de la goutte Σ_3 est voisine de 5,46 mm². La section conique n'est visible que sur une partie du fil, et ne se trouve pas en regard de la zone la plus conductrice du plasma. Comptenu des observations réalisées, on peut considérer que la partie périphérique de la colonne d'arc en recouvre une surface $\Sigma_1' \approx 0,69$ mm². La goutte constitue donc l'essentiel de l'extrémité de l'électrode ; elle est en contact avec un plasma relativement homogène. Les différentes sections sont présentées sur le Tableau VI.3].

Section	Σ_1' : Cône	S_2 : Cylindre	Σ_3 : Goutte
Surface en contact avec le plasma (mm ²)	$0,69 \pm 0,01$	/	$5,46 \pm 0,01$

Interface	Zone « pauvre »	Zone « riche »
Surface interface (mm ²)	$0,69 \pm 0,01$	$5,46 \pm 0,01$
Surface totale (mm ²)	$6,15 \pm 0,01$	

Tableau VI.3 : Surface des différentes sections en régime globulaire, fil massif 70 S

Le calcul du volume de la goutte donne une valeur de 1,38 mm³ d'où un poids de 93,1 μ N, environ quinze fois supérieur à celui trouvé en pulvérisation axiale. Le calcul de la force due à la tension de surface est plus délicat car la goutte est fortement décentrée : selon l'angle considéré, on trouve des valeurs variant d'environ 2,1 mN à 6,7 mN.

ii. Etude des fils fourrés

Pour le fil G002, le régime globulaire établi [Cf. Figure VI.10] est obtenu pour un courant de 300 ampères sous argon + 30% de CO₂. Il est très similaire à celui des fils massifs, la principale différence concernant la plus grande irrégularité de la forme de la goutte : globalement sphérique, elle est moins stable au cours du temps et présente parfois des oscillations de surface. Dans ces conditions, on peut considérer que les différentes surfaces Σ_1' et Σ_3 sont comparables à celles des fils massifs.

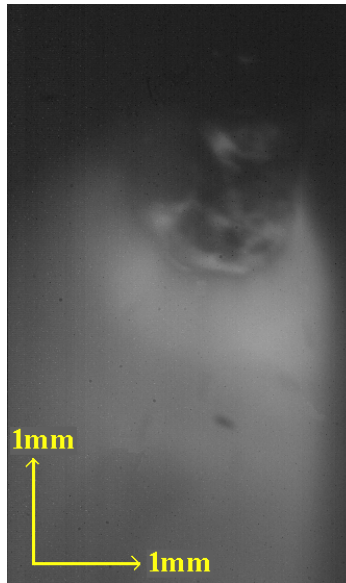


Figure VI.10 : Soudage sous argon + 30% CO₂, I = 300 A pour un fil fourré (G002), caméra Fastcam (avec filtre bleu).
 [Conditions expérimentales : Fil fourré G002 ; $I_{arc} = 300$ A ; $V_{fil} = 9,8$ m/mn ; Ar + 30% CO₂ ; $D_g = 20$ l/mn]

2.3. Conclusion

i. Comparaison des forces en présence

Les valeurs de la force de Lorentz présentées dans la littérature [36] sont toujours très supérieures aux poids des gouttes formées à l'extrémité du fil-anode [Cf. Tableau VI.4], mais restent comparables à la force due à la tension de surface. Dans le tableau, les forces verticales descendantes (contribuant au détachement) sont positives, les forces verticales ascendantes sont négatives.

La faible influence du poids des gouttes formées explique, en particulier, pourquoi il est possible de souder « à l'envers » (avec la pièce au-dessus de la torche), d'autant que les gouttes ont une vitesse initiale liée à la vitesse d'avance du fil (9 m/mn à 11,4 m/mn pour les cas présentés) et sont entraînées par le flux du plasma ($V_{max} = 500$ m/s [58])

Il faut noter que, dans le cas globulaire, la force électromagnétique peut par ailleurs changer de sens et empêcher le détachement du métal liquide.

Fil	Régime de soudage	Poids de la goutte [μ N]	Force liée à la tension de surface [mN]	Force de Lorentz [36] [mN]
Fil Massif 70 S	Pulvérisation	$6,2 \pm 0,1$	$-5,5 \pm 0,1$	4 à 7
	Globulaire	$93,1 \pm 0,1$	$-2,1$ à $-6,7 \pm 0,1$	$\approx \pm 2$
Fil Fourré G002	Pulvérisation	$20,3 \pm 0,1$	$-6,1 \pm 0,1$	4 à 7
	Globulaire	$93,1 \pm 0,1$	$-2,1$ à $-6,7 \pm 0,1$	$\approx \pm 2$

Tableau VI.4 : Comparaison des différentes forces en présence

ii. Surfaces d'interaction électrode-plasma

Pour les fils massifs, pour un même courant d'arc (330 A) :

- la surface totale du fil fondu est nettement plus importante dans le cas de la pulvérisation axiale sous argon pur ($\approx 7,41$ mm²) qu'en régime globulaire sous mélange Ar + 20% CO₂

($\approx 6,50 \text{ mm}^2$) [Cf. Tableau VI.5]. Cette observation semble corroborer les modèles présentés dans la littérature (notamment dans [34]), qui considèrent qu'une plus faible surface en contact avec le plasma se traduit par un resserrement des lignes de courant, génère une force électromagnétique répulsive, et favorise le passage en mode globulaire.

- Cependant, si on ne tient compte que de la surface réellement en contact avec le plasma, la différence entre les deux régimes de fonctionnement disparaît ($\Sigma_l \approx 6,18 \text{ mm}^2$ en pulvérisation axiale, et $\approx 6,15 \text{ mm}^2$ en régime globulaire).
- Elle s'inverse même si on ne considère que la partie du plasma qui assure l'essentiel du passage du courant (zone centrale lumineuse, observée sous filtre interférentiel bleu) : la surface est alors une fois et demie plus importante en régime globulaire ($\approx 5,46 \text{ mm}^2$) qu'en régime de pulvérisation axiale ($\approx 3,80 \text{ mm}^2$).

Pour les fils fourrés, on constate que dans tous les cas, la surface est plus importante en régime globulaire qu'en pulvérisation axiale [Cf. Tableau VI.5].

Fil	Zone pauvre (mm^2)	Zone riche (mm^2)	Total (mm^2)	Surface complète (mm^2)
70 S Pulvérisation	2.38	3,8	6.18	7,41
70 S Globulaire	0,69	5,45	6,14	6,5
G002 Pulvérisation	2.29	2	4.29	5,47
G002 Globulaire	0,69	5,45	6,14	6,5

Tableau VI.5 : Surface des différentes sections pour les fils 70 S et G002

En supposant que l'essentiel du passage du courant se fait à travers la zone du plasma riche en vapeurs métalliques, de conductivité électrique est plus importante, il apparaît que la densité de courant à la surface de l'électrode est plus faible en régime globulaire qu'en pulvérisation axiale : cela pourrait être dû à une plus faible conductivité électrique à la surface du fil-fusible.

L'angle α , qui définit la zone conductrice du plasma [Cf. Figure VI.5], est un paramètre important pour caractériser le régime de soudage : son augmentation sous mélange Ar-CO₂ du fait notamment de la plus faible conductivité de la surface de l'électrode, entraîne le changement de sens de la force électromagnétique.

La modification des caractéristiques métallurgiques de l'électrode lorsqu'on soude sous argon pur ou sous mélange Ar-CO₂, impose le type de régime de soudage, la modification de la force électromagnétique, qui agirait comme effet amplificateur, n'étant qu'une conséquence de la formation de gouttes de plus gros diamètre. L'étude des caractéristiques métallurgiques de l'électrode fera l'objet du chapitre suivant.

2.4. Cas particuliers

i. Le transfert répulsif avec veine liquide

En régime globulaire, le transfert répulsif est généralement associé à une goutte de gros diamètre à l'extrémité de l'électrode. Cependant, au voisinage de la transition avec le régime de pulvérisation axiale, on observe un cas intermédiaire [Cf. Figure VI.11] qui, bien qu'associé au régime globulaire (le métal est projeté loin de l'axe du fil), présente certaines caractéristiques de la pulvérisation axiale : une veine de métal liquide et une zone centrale lumineuse, nettement définie, formant un cône au niveau de l'accrochage de l'arc sur l'électrode. Cependant la veine de métal

dévie et remonte vers le haut du fil, formant un angle aigu β par rapport à l'axe du fil, représenté schématiquement sur la Figure VI.11 :

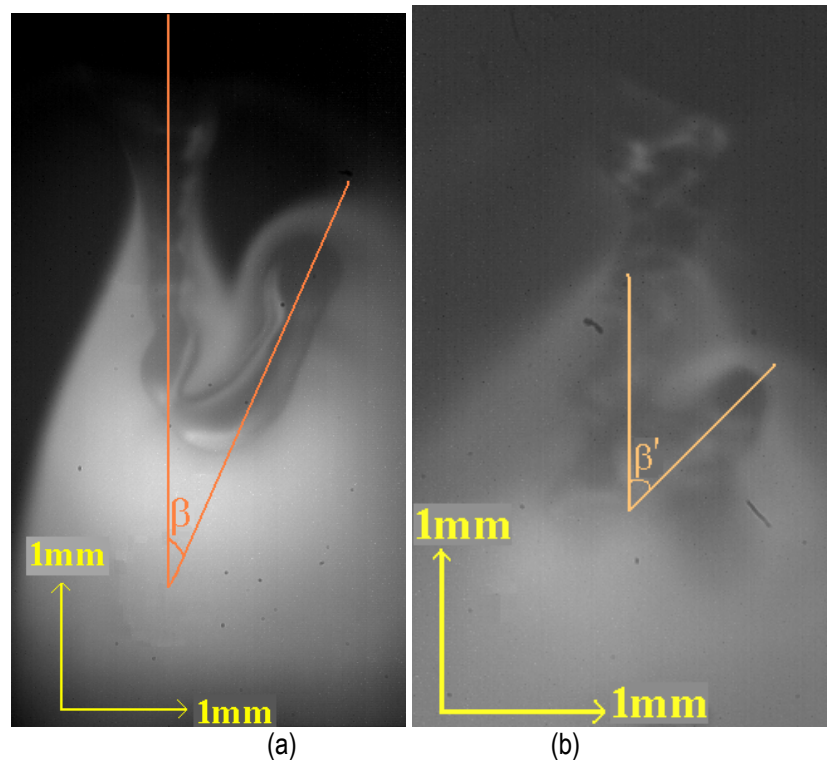


Figure VI.11 : Transfert répulsif

(a) : fil massif 70 S, angle β ; (b) : fil fourré G007, angle β' .

[Conditions expérimentales : 70 S : $I = 330$ A, $V_{fil} = 9$ m/mn, argon + 15% CO_2 ; G007 : $I = 240$ A, $V_{fil} = 7,3$ m/mn, argon + 25% CO_2 ; $D_g = 20$ l/mn]

- La veine de métal est nettement définie dans le cas du fil massif. Pour le fil fourré elle est plus irrégulière, mais la forme globale de l'écoulement de métal est similaire.
- L'angle β varie au cours du temps, pour un même essai. Souvent assez faible (typiquement $20^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$), il peut atteindre 60° . Néanmoins, il reste toujours inférieur à 90° , ce qui signifie que la veine de métal est repoussée au-dessus de l'horizontale.

Dans certains cas, l'angle β est si faible que la veine de métal remonte au contact du fil. Une goutte de fort diamètre peut alors se former, et la configuration de l'électrode redevient alors celle rencontrée en régime globulaire classique.

La Figure VI.12 présente la séquence de détachement de l'extrémité de l'électrode (on ne peut plus, à ce niveau, l'associer à une goutte) observée sous filtre interférentiel bleu :

- Immédiatement après le détachement (images 2 et 11), la veine de métal liquide est semblable à celle observée en régime de pulvérisation axiale [Cf. Figure VI.5]. Il semble qu'une goutte se forme alors à l'extrémité de la veine liquide par retour du métal liquide vers le fil-anode.
- Dès l'image suivante (image 3), on peut voir l'extrémité de la veine liquide s'incurver vers la droite et commencer à déformer le bord droit de la zone centrale du plasma. Une zone très lumineuse se forme alors dans le plasma, juste sous le coude formé en regard de la cathode : elle correspond très certainement à une forte vaporisation de métal ;
- Sur l'image 6 et sur les suivantes, on peut voir la déformation de la zone la lumineuse du plasma qui 'suit' celle du métal liquide.
- A partir de l'image 9, il se forme un pincement entre la veine verticale, issue du fil, et la veine remontant vers le haut : c'est à cet endroit que se produit finalement le détachement par rupture de la veine liquide verticale.
- La rupture se produit toujours à la même position au-dessus de la cathode (image 2 et 11), à

une distance comparable à celle observée pour le détachement des gouttes en régime de pulvérisation axiale.

- Le métal liquide est éjecté vers l'extérieur de la colonne de plasma avec un mouvement de rotation selon l'axe de la direction d'observation.
- La durée totale d'une séquence (image 2 → image 11) est de l'ordre de 3 ms.

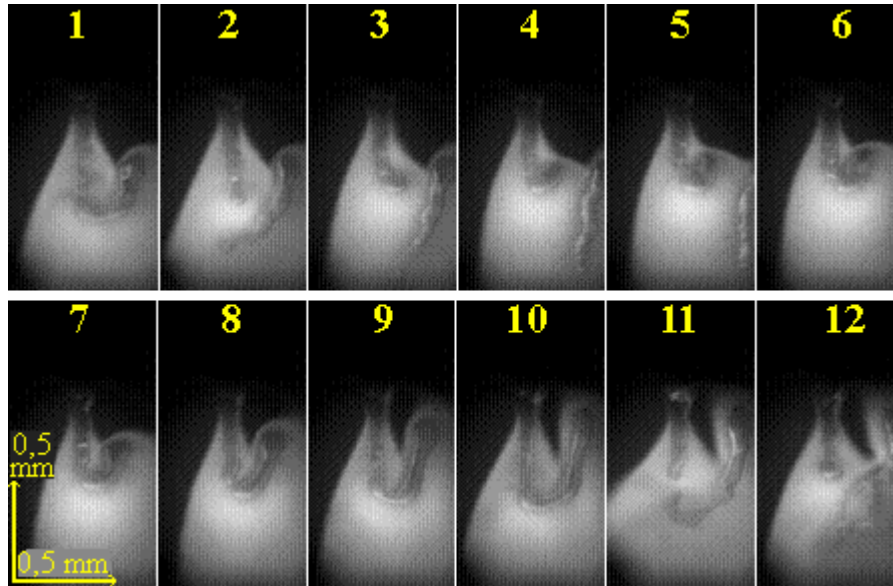


Figure VI.12 : Détachement d'une goutte pour le fil 70 S sous argon + 15% CO₂, I = 330 A ; 333 μs entre deux images.
[Conditions expérimentales : $V_{fil} = 9$ m/mn ; argon + 15% CO₂ ; $D_g = 20$ l/mn]

Compte tenu de la faible masse de métal mis en jeu, le poids du métal soulevé est très faible. Si on mesure le volume du métal soulevé sur l'image 10 on obtient une valeur de 0,3 mm³ d'où un poids de 18 μN (en considérant que le métal a une densité de 6,9). La force nécessaire pour expliquer ce phénomène est donc peu importante. Elle peut résulter de la viscosité du plasma, qui formerait une barrière à l'avance du métal liquide. Celui-ci serait repoussé par cet "obstacle" jusqu'à ce que l'inertie du métal soulevé soit suffisante pour déstabiliser la veine de métal et conduire à sa rupture. Cette hypothèse est appuyée par le fait qu'on observe une zone nettement plus lumineuse juste en dessous du point d'inflexion de la veine de métal liquide (en particulier sur les images 2 à 10). Les mesures spectroscopiques présentées au chapitre VIII semblent confirmer cette hypothèse, puisqu'on constate une augmentation de la concentration en vapeurs métalliques avec l'ajout de CO₂.

L'effet d'une composante radiale importante de la force électromagnétique évoquée pour le régime globulaire classique peut également expliquer ce comportement.

ii. Le transfert par « pulvérisation multi-goutte »

Pour les fils fourrés, les deux cas extrêmes (régime globulaire et pulvérisation axiale) correspondent à ceux observés pour les fils massifs. Cependant il existe un cas intermédiaire, que nous avons qualifié de « pulvérisation axiale multi-gouttes », observé pour un taux de CO₂ important mais inférieur à la valeur entraînant la transition vers le régime globulaire. La veine de métal est courte et se pulvérise en petits lambeaux de taille hétérogène qui sont projetés dans l'axe du fil. Une zone centrale du plasma, conique et très lumineuse, est visible et le transfert est stable.

Ce régime, qui présente une majorité de caractéristiques communes avec la pulvérisation axiale, y est donc associé. Il est par ailleurs nettement différent du régime de transfert explosif décrit dans la nomenclature de l'Institut international de soudure IIW [148], car on observe une réduction du diamètre de l'électrode (tronçon de cône) avant le détachement du métal. Les photographies et la représentation schématique de ce régime sont données sur la Figure VI.13.

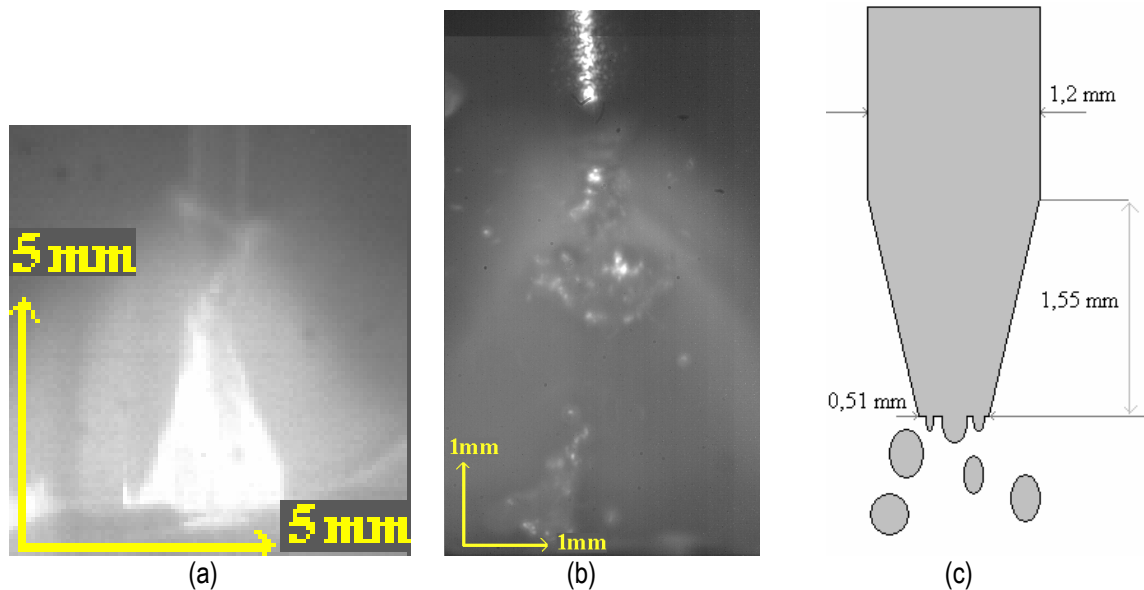


Figure VI.13 : Pulvérisation multigoutte : Fil fourré Mégafil,
 (a) caméra MVS 135 (filtre bleu) ; (b) caméra Fastcam (éclairage laser) ;
 (c) représentation schématique de la veine de métal liquide
 [Conditions expérimentales : $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn ; argon + 20% CO₂ ; $D_g = 20$ l/mn]

3. ETUDE DE LA TRANSITION POUR LES DIFFERENTS FILS

3.1. Procédure de mesure

Les deux principaux paramètres influant sur le type de régime de transfert sont le courant et la composition du gaz de protection. Dans l'industrie, il est plus aisé de modifier le courant que le gaz. En effet dans ce cas, le gaz de protection est contenu dans une bouteille, il faut donc la remplacer pour changer de composition. De plus, le réglage du courant peut se faire avec précision (1 ou 2 A). Cependant, la modification du courant impose d'ajuster la vitesse d'avance du fil, pour que l'arc fonctionne toujours dans des conditions optimales. Comme il est plus simple de n'avoir à modifier qu'un seul paramètre à la fois, il a donc été choisi de mener l'étude en faisant varier la composition du gaz à courant constant, pour différentes valeurs de celui-ci. Avec le dispositif utilisé, une précision suffisante (0,77%) est disponible pour le choix de la composition du mélange gazeux. L'étude pour les différents fils a été menée en faisant varier le taux de CO₂ dans l'argon par pas de 5%. Cette procédure permet d'obtenir une précision acceptable tout en limitant le nombre d'essais à réaliser.

Pour établir une référence (avec le fil 70 S) une plus grande précision était nécessaire. C'est la première méthode (variation du courant pour un mélange gazeux donné) qui a donc été utilisée.

Différents fils-électrode ont été testés, l'objectif étant de déterminer celui assurant un transfert stable (régime de pulvérisation axiale) pour un taux de CO₂ le plus élevé possible. Pour chacun d'eux, on recherche à courant d'arc fixé et débit total de gaz constant (typiquement $I = 330$ A et $D_g = 20$ L/mn), la transition globulaire-pulvérisation axiale en faisant varier la proportion de dioxyde de carbone dans le gaz de protection. Pour corréler les mesures réalisées avec les données utilisées dans l'industrie (courant de transition pour un mélange gazeux donné), les essais sont répétés pour plusieurs courants, dans la gamme 240 A – 410 A. La procédure suivante permet de réduire le nombre d'expériences :

- Pour un courant donné I° , on augmente progressivement le taux X de CO₂ jusqu'à obtenir la transition X° de la pulvérisation axiale vers le régime globulaire ;
- On commence alors par augmenter la valeur du courant. Si pour la valeur maximale du courant que peut fournir le générateur (410 A), on retrouve le régime de pulvérisation axiale,

alors on augmente le taux de CO₂ jusqu'à repasser en régime globulaire

- Puis, pour quelques valeurs de courants inférieurs à I° (par exemple 240 A ou 300 A), on recherche à partir du taux X° précédemment déterminé, celui pour lequel on repasse en pulvérisation axiale.

La transition entre les deux régimes est alors identifiée sur les graphes du courant d'arc en fonction du taux de CO₂ dans le gaz de protection, et on trace alors pour chaque électrode utilisée, le graphe donnant le courant de transition en fonction de la composition du gaz.

3.2. Critères de détermination du régime de transfert

i. Présentation

L'étude menée par S Zielinska [1] a montré que pour les fils massifs (fil 70 S), la transition pulvérisation axiale-globulaire à courant d'arc donné, s'effectuait progressivement sur une certaine plage de valeurs du taux de CO₂. Nos travaux ont confirmé cette observation, que ce soit pour les autres types de fils massifs ou pour les fils fourrés que nous avons utilisés.

Alors que les différents types de transfert de métal présentés dans la première partie étaient parfaitement différenciés car observés en régime établis, il devient délicat au voisinage de la transition pulvérisation axiale-globulaire, d'identifier le régime à partir d'un seul critère. En particulier, la classification de l'institut international de soudure IIW [148] basée sur la comparaison des tailles des gouttes et du fil (diamètre inférieur à celui du fil pour la pulvérisation axiale ; supérieur pour le régime globulaire), peut s'avérer totalement insuffisante puisque, d'une part la transition s'accompagne souvent d'une instabilité importante, et d'autre part la notion même de gouttes sphériques devient inadaptée...

Pour déterminer le passage de la transition, nous nous sommes basés sur plusieurs critères :

- La forme de l'arc, conformément à la terminologie présentée au paragraphe précédent (en cloche pour le régime globulaire, en cône pour la pulvérisation axiale). Ce critère est le plus important.
- La fréquence de détachement des gouttes, mesurée à partir des enregistrements réalisés avec la caméra Fastcam 1024-PCI. Ce paramètre a déjà été employé pour caractériser le régime de transfert, notamment par S.Rhee et E.Kannatey-Asibu [119], le passage en régime de pulvérisation axiale se caractérisant par une forte augmentation de la fréquence de détachement des gouttes.
- Dans une moindre mesure, les variations de la tension d'arc aident également à différencier les régimes, la tension étant plus stable en pulvérisation axiale qu'en régime globulaire. Cet effet est à rapprocher du grossissement des gouttes et de la réduction de leur fréquence de détachement constatée dans ce dernier cas. Leur séparation modifie momentanément la longueur d'arc, donc la résistance inter-électrodes d'où une modification, à courant constant, de la tension. Plus les gouttes sont grosses et leur détachement lent et irrégulier et plus la tension est perturbée.
- Un dernier paramètre, plus intuitif, est le bruit généré par l'arc, et qui est très caractéristique d'un régime de soudage à l'autre.

ii. Etude de la forme de l'arc

Les fils massifs et les fils fourrés présentent, au niveau des formes de l'arc et de l'extrémité de l'électrode, quelques différences concernant les régimes de soudage.

a/ Pour les fils massifs :

La pulvérisation axiale se définit par une réduction du diamètre du fil à environ un tiers de sa valeur initiale. La zone du plasma riche en vapeurs métalliques, est un cône nettement défini au centre de la colonne, et s'accroche sur une veine de métal qui s'étend sur environ 2,5 mm.

Le régime globulaire se définit par de grosses gouttes se formant successivement à l'extrémité du fil. On ne distingue plus de rétrécissement du diamètre, et la goutte constitue toute la zone fondue. Les vapeurs métalliques sont réparties de manière plus homogène dans le plasma. Le transfert répulsif avec une veine de métal liquide est également classé comme globulaire.

b/ Pour les fils fourrés

La pulvérisation axiale sous argon pur et faible taux de CO₂ (moins de 5%) se caractérise par un transfert avec une veine de métal liquide et un accrochage en cône similaire à celui du fil plein. La veine de métal est cependant plus courte et la zone riche en vapeurs métalliques couvre surtout l'extrémité des gouttes qui se détachent.

Le régime de « pulvérisation multi-gouttes » est observé pour des taux de CO₂ supérieurs, principalement pour les fils contenant des alcalins (G007 à G012 et Mégafil). Pour les autres fils fourrés (G002 à G006), les gouttes se détachent plutôt en gros lambeaux de forme assez irrégulière (d'autant plus que le taux de CO₂ est élevé) avant de se dissocier dans l'arc. Cependant ce régime diffère du transfert dit *explosif* pour lequel c'est l'extrémité même de l'électrode qui se désagrège.

Le régime globulaire se caractérise par de grosses gouttes irrégulières se formant successivement à l'extrémité du fil. L'accrochage de l'arc se fait en cloche autour et/ou au-dessus de la goutte.

iii. Mesure de la fréquence de détachement

La fréquence moyenne de détachement des gouttes est mesurée en analysant image par image les films réalisés par cinématographie rapide (333 μs entre deux images pour une fréquence d'acquisition de 3000 images par seconde), et en y identifiant les images correspondant à la séparation des gouttes successives.

Alors que pour les fils massifs, cette identification est aisée, elle est beaucoup plus délicate pour les fils fourrés. En effet, le métal étant moins dense du fait de la présence du flux en poudre, on observe parfois des éclatements à la surface de la goutte (notamment en régime globulaire) et des projections de lambeaux de métal, mais qu'il convient de distinguer du détachement réel des gouttes au risque de surestimer la fréquence cherchée. Un soin particulier doit donc être apporté à l'analyse des films.

Pour des fréquences élevées (cas de la pulvérisation axiale), l'étude de cent à deux cent photos suffit pour avoir une moyenne précise ; pour les fréquences les plus basses (en régime globulaire), il est par contre souvent nécessaire d'étudier plus d'un millier de photographies. Menée pour l'ensemble des fils étudiés sous divers mélanges gazeux et différents courants, cette procédure nécessite un temps de calcul assez important.

Pour le fil de référence 70 S, on voit sur la Figure VI.14 des points correspondant aux deux types de régime : les fréquences les plus élevées (800 Hz et 400 Hz) correspondent à la pulvérisation axiale, les fréquences basses (moins de 100 Hz) au régime globulaire. La transition vers le régime globulaire correspond donc une réduction importante de la fréquence, puis une fois que ce régime est établi la valeur présente de très faibles variations. La pente se réduisant significativement lorsque la fréquence est comprise entre 100 et 300 Hz on peut supposer que la fréquence associée à la transition est comprise entre ces deux valeurs. En comparant l'évolution de la fréquence avec celle de la forme de l'arc, nous avons déterminé qu'une valeur limite de 250 Hz fournissait des résultats en bon accord avec ce deuxième critère. Lorsque la fréquence est supérieure à cette limite on considère donc que le régime est de type pulvérisation axiale, lorsqu'elle est inférieure on le classe comme globulaire.

La fréquence de détachement des gouttes a été déterminée pour les différents courants (de 240 à 410 ampères) essentiellement pour identifier la transition de régimes. Par la suite, nous ne donnerons pour chacun des fils étudiés, que les fréquences de détachement mesurées à 330 A pour comparaison avec les autres paramètres de l'arc (tension et longueur d'arc).

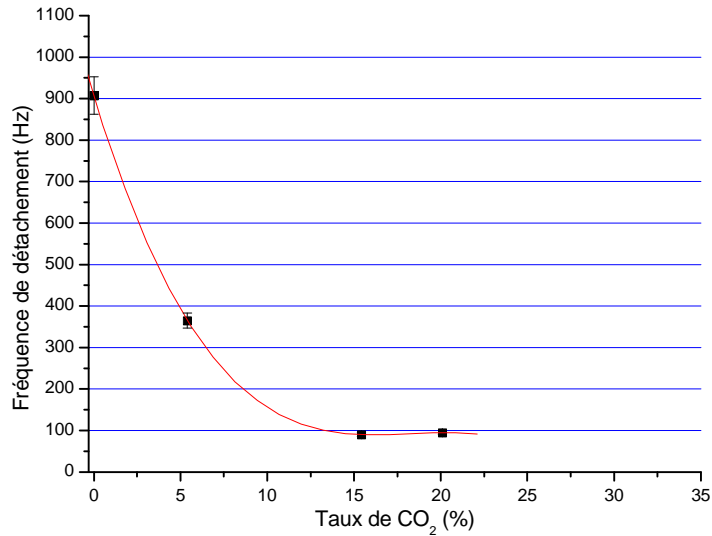


Figure VI.14 : Fréquence de détachement des gouttes en fonction du taux de CO₂ pour le fil 70 S
 [Conditions expérimentales : $I_{arc} = 330$ A ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

iv. Régime de transition

La transition pulvérisation axiale-globulaire peut se décrire par les étapes suivantes :

- A partir du cas de la pulvérisation axiale établi, l'arc commence à se déformer avec un accrochage plus arrondi puis le détachement des gouttes est perturbé.
- Lorsque le taux de CO₂ augmente, les gouttes sont d'abord projetées sur le côté (transfert répulsif), puis des grosses gouttes se forment de plus en plus fréquemment.
- La proportion de grosses gouttes (avec un accrochage de l'arc en cloche) augmente jusqu'à ce que ce soit le seul mode de transfert du métal (régime globulaire établis).
- Au niveau de l'arc, l'accrochage reste proche du cône tant qu'une veine de métal est présente. Durant le transfert répulsif, un large panache de vapeurs métalliques accompagne les gouttes ; la zone centrale de l'arc se déforme au moment du détachement des gouttes.

Pour des paramètres proches de la transition, le transfert de métal présente des caractéristiques intermédiaires entre les deux régimes. On peut donc définir deux cas particuliers :

- La limite de pulvérisation axiale, où les caractéristiques de ce régime sont prépondérantes : présence d'une veine de métal liquide et accrochage de l'arc en cône. Des passages de courte durée en régime globulaire (grosses gouttes se formant à l'extrémité de l'électrode) peuvent se produire.
- La limite globulaire est caractérisée par un transfert à grosses gouttes prépondérant. Le rapport d'images correspondant au détachement de petites gouttes est inférieur à 50%. Lorsque les gouttes se détachent par transfert répulsif, elles sont comptabilisées comme régime globulaire même si la fréquence est supérieure à 250 Hz.

Le classement d'un essai particulier dans un de ces deux types de régimes de transition, se fait en déterminant la proportion d'images correspondant au détachement rapide de petites gouttes : si elle est supérieure à 50%, ce sera la limite globulaire ; sinon ce sera la limite de pulvérisation axiale.

3.3. Résultats

i. Présentation

Pour établir la référence, des mesures complémentaires ont été réalisées pour étendre les résultats obtenus par S. Zielinska [1]. Ceux-ci avaient pour objet de déterminer le taux de CO₂ provoquant la transition pour différents courants et un fil-anode de type 70 S.

Le gaz de protection est fixé et le courant est modifié par pas de 2 A entre 200 et 410 A. Les mesures ont été effectuées pour les compositions suivantes du gaz de protection : argon pur, argon + 2,3% CO₂, argon + 5,4% CO₂, argon + 7,7% CO₂, argon + 12,3% CO₂ et argon + 17,1% CO₂. Les résultats sont présentés sur le graphe Courant - Taux de CO₂ de la Figure VI.15.

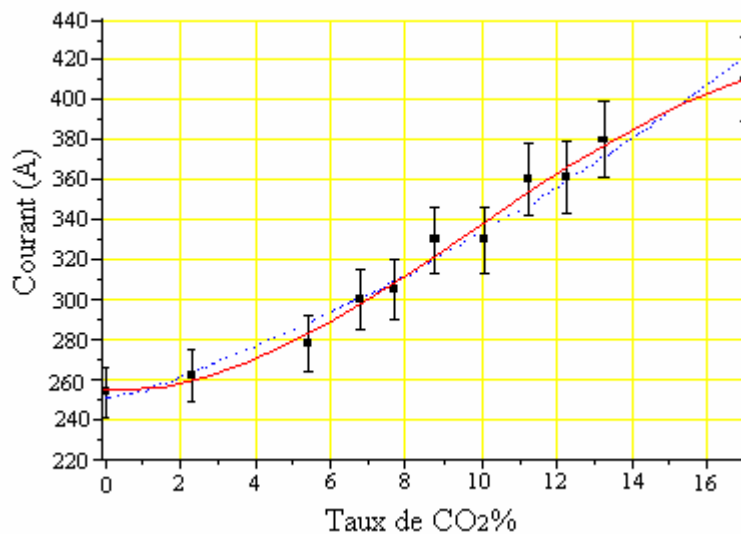


Figure VI.15 : Transition entre le régime globulaire et la pulvérisation axiale en fonction du taux de CO₂ et du courant.
[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S, $\varnothing \approx 1,2$ mm ; $D_g = 20$ l/mn]

Une approximation polynomiale d'ordre 2 des données (représentée en pointillés sur le graphe) permet, par extrapolation, de déterminer un courant théorique de 2825 ampères pour obtenir la transition vers le régime de pulvérisation axiale sous CO₂ pur.

On définira la performance d'un fil par rapport à la position de la transition : plus elle est observée pour un courant modéré et un taux de CO₂ élevé et plus le fil est performant. Sur les graphes, cela se traduit par la position de la courbe tracée : plus elle est décalée vers la droite et plus le fil est performant. Deux critères sont étudiés : d'une part la position globale de la courbe et d'autre part le comportement pour les faibles courants.

ii. Etude des fils massifs

Quatre fils de composition différente ont été comparés au fil 70 S. Deux d'entre eux se différencient par un taux de silicium plus bas (AS 26 et AS 35), et les deux autres fils étudiés (AS 42 et S₂MoTi) contiennent du titane [Cf. section V.2.5.i, page 89].

a/ Fils à bas silicium

Pour les deux fils contenant un taux de silicium inférieur au fil de référence [Cf. Figure VI.16], on constate que la transition est obtenue pour des taux de CO₂ d'autant plus importants que le taux de silicium est faible. Par ailleurs, la valeur maximale du taux de CO₂ permettant d'atteindre le régime de pulvérisation axiale dans les conditions fixées par le générateur utilisé ($I < 450$ A) est

obtenue pour le fil AS 26, avec 30% en volume, contre 17% pour le fil de référence 70 S. Pour un courant faible (240 A) le comportement du fil AS 26 est cependant plus proche de celui de ce fil.

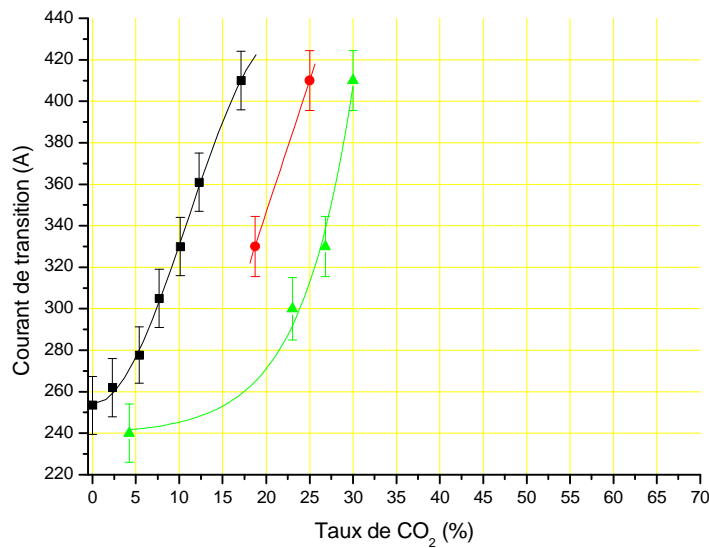


Figure VI.16 : Courant de transition en fonction du gaz : fils massifs 'bas Silicium'
 [■ 70 S : 0,35% Si ; ● AS 35 : 0,12% Si ; ▲ AS 26 : 0,064% Si]
 [Conditions expérimentales : Fil massif, $\varnothing \approx 1,2$ mm ; $D_g = 20$ l/mn]

b/ Fils contenant du titane

Le comportement des fils contenant du titane (AS 42 et S₂MoTi) est très proche de celui du fil de référence [Cf. Figure VI.17], si ce n'est peut être à 330 A où la transition est observée pour des taux de CO₂ légèrement supérieurs.

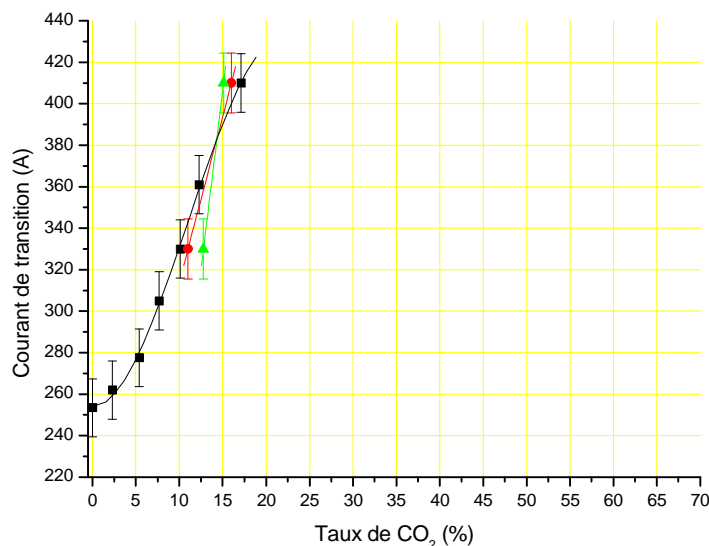


Figure VI.17 : Courant de transition en fonction du gaz : fils massifs 'Titane'
 [■ 70 S : 0,001% Ti ; ● AS 42 : 0,30% Ti ; ▲ S₂MoTi : 0,10% Ti]
 [Conditions expérimentales : Fil massif $\varnothing \approx 1,2$ mm ; $D_g = 20$ l/mn]

iii. Etude de fils fourrés

a/ Fils à bas silicium

Le taux limite de CO₂ permettant la pulvérisation axiale est un peu plus élevé pour le fil G002 que pour le fil AS 26 [Cf. Figure VI.18], l'allure de la répartition des points étant tout à fait similaire : l'écart constaté est très certainement dû à la différence sur le taux de silicium.

Pour le fil ne contenant quasiment pas de silicium (G004), la transition est observée à bas courant pour un taux de CO₂ beaucoup plus élevé (23%) que pour les autres fils (7% pour le fil G002). Par contre, cet effet disparaît aux courants plus élevés, où les performances sont semblables au fil AS 26 : il semble donc exister une limite à l'effet de la teneur en silicium sur la position de la transition.

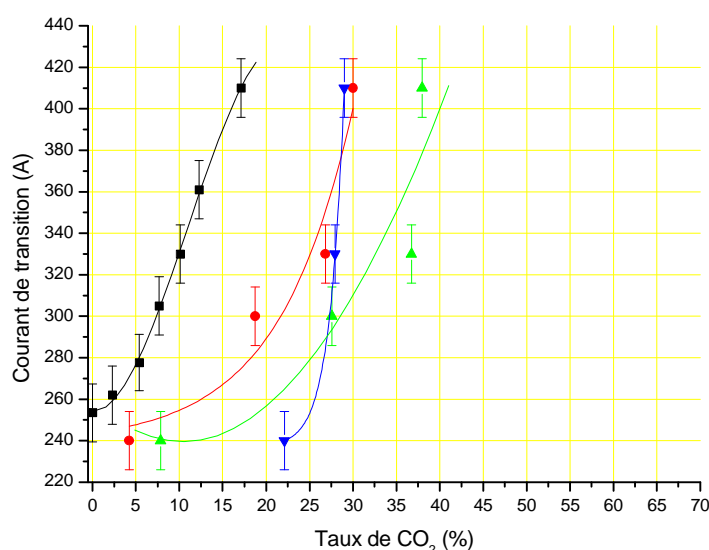


Figure VI.18 : Courant de transition en fonction du gaz : fils fourrés 'bas Silicium'
[■ 70 S : 0,35 % Si ; ● AS 26 : 0,064% Si ; ▲ G002 : 0,048% Si ; ▼ G004 : 0,010% Si]
[Conditions expérimentales : Fil fourré Ø ≈ 1,2 mm ; D_g = 20 l/mn]

b/ Fils contenant du titane et du zirconium : éléments susceptibles de former des oxydes conducteurs

Un fil fourré contenant un fort taux de titane (G003 : 1% Ti) et deux fils contenant du zirconium (G005 : 0,36% et G006 : 0,33% Zr) ont été étudiés [Cf. Figure VI.19]. Le dernier contient également du lanthane en proportion équivalente au zirconium :

- Le fil G003 contenant du titane présente des performances toujours plus faibles que le fil G002, mais comparables à celles du fil AS 26, au moins pour les courants supérieurs à 330 A. Il faut cependant tenir compte du taux de silicium plus élevé (0,074% Si contre 0,048% Si pour le G002 et 0,64% Si pour l'AS 26).
- Le fil G005 contenant du zirconium est celui présentant les meilleures performances : avec un taux de silicium voisin de celui de l'AS 26, on observe une transition comparable à celle obtenue pour le fil G002, qui ne contient que 0,048% Si. L'apport de zirconium compense donc l'effet du silicium.
- Le fil G006 (au zirconium et au lanthane) présente par contre un comportement un peu moins bon.

Pour tous ces fils contenant des éléments susceptibles de former des oxydes conducteurs (Zr et/ou Ti), la transition est cependant nettement améliorée aux faibles courants, avec des taux de CO₂ supérieurs à 15% à 240 A.

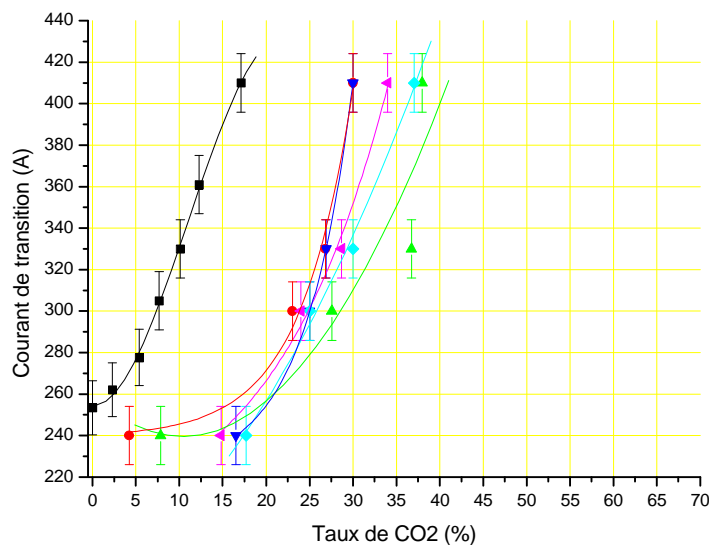


Figure VI.19 : Courant de transition en fonction du gaz : fils fourrés 'Titane' et 'Zirconium'
 [■ 70 S : 0,35 % Si ; ● AS 26 : 0,064% Si ; ▲ G002 : 0,048% Si ;
 ▼ G003 : 0,074% Si + 0,94% Ti ; ◆ G005 : 0,060% Si + 0,36% Zr ;
 ◆ G006 : 0,05% Si + 0,033% Zr + 0,026% La]
 [Conditions expérimentales : Fil fourré Ø ≈ 1,2 mm ; D_g = 20 l/mn]

c/ Fils contenant des alcalins

L'étude a été menée pour des fils avec plus ou moins de silicium, mais contenant des alcalins : outre leur effet sur la fonction de travail de l'électrode, ces éléments influent sur la fusion du fil.

Fil à bas taux de silicium

Les performances de ces différents fils sont comparées aux fils G002 et G004 [Cf. Figure VI.20]. Parmi les trois alcalins étudiés (lithium, sodium et potassium) on constate que le sodium (fil G008) présente les performances les moins bonnes puis que son comportement se rapproche du fil de référence.

Les fils contenant du lithium sont par contre particulièrement performants, puisque même pour un taux très faible (G007 : 0,005% Li), on constate une amélioration par rapport aux deux fils de référence à bas silicium (G002 et G004 – Transitions à 240 A / 8% de CO₂, et 240 A / 22% de CO₂, resp.), avec une transition à 26% de CO₂ sous 240 A. Néanmoins, les performances restent comparables aux courants plus élevés.

L'effet du lithium est encore plus visible avec le fil G012 (0,143% Li) pour lequel la transition est observée à plus de 40% de CO₂ sous 240 ampères, et même au-delà de 50% de dioxyde de carbone pour un courant supérieur à 330 ampères.

Le potassium produit également un effet bénéfique, puisque les performances du fil G009 (0,143% K) sont comparables à celles du fil au lithium. Une concentration supérieure est cependant nécessaire pour produire un effet comparable.

Le fil présentant les meilleures performances (G010) est celui rassemblant les deux alcalins ayant donné de bons résultats (lithium et potassium) ; la transition vers le régime de pulvérisation axiale est alors observable pour des taux de CO₂ supérieurs à 50% sous des courants usuels (de 300 à 450 ampères). Néanmoins, ce résultat ne tient pas compte de la qualité du cordon de soudure réalisé, et les essais pratiques ont montré une maniabilité médiocre. Ainsi, si ce type de fil pourrait

répondre aux critères recherchés, il reste nécessaire d'optimiser sa composition de façon à le rendre techniquement utilisable.

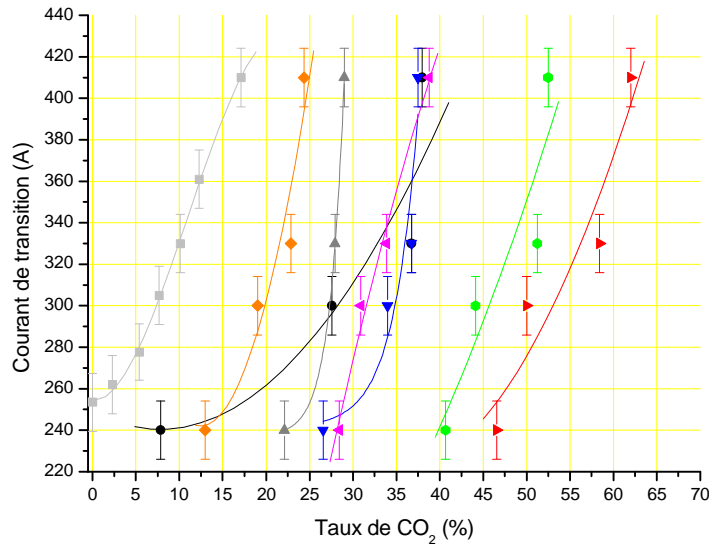


Figure VI.20 : Courant de transition en fonction du gaz : fils fourrés 'bas silicium' et 'alcalins'
 [■ 70 S : 0,35 % Si ; ● G002 : 0,048% Si ; ▲ G004 : 0,001% Si ; ▼ G007 : 0,007% Si + 0,005% Li ;
 ◆ G008 : 0,010% Si + 0,042% Na ; ▼ G009 : 0,008% Si + 0,150% K ; ► G010 : 0,061% Si + 0,005% Li + 0,093% K ;
 ● G012 : 0,012% Si + 0,143% Li]
 [Conditions expérimentales : Fil fourré $\varnothing \approx 1,2$ mm ; $D_g = 20$ l/mn]

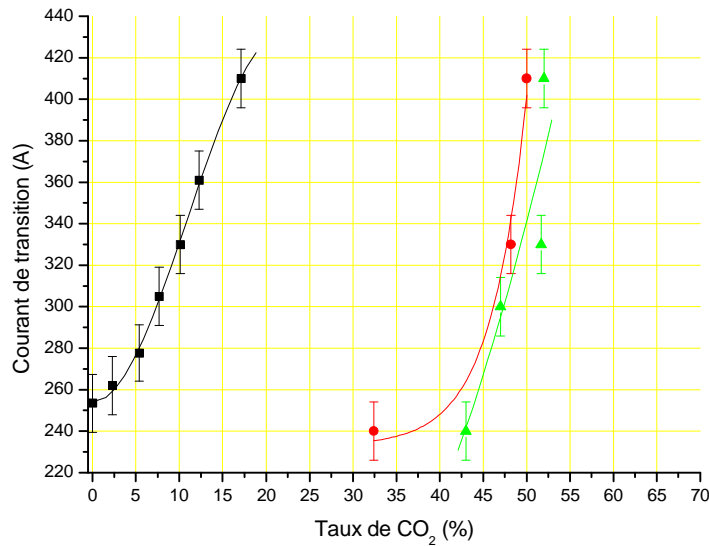


Figure VI.21 : Courant de transition en fonction du gaz : : fils fourrés 'haut silicium' et 'alcalins'
 [■ 70 S : 0,35% Si ; ● Mégafil : 0,8 % Si + 0,017% Li + 0,13 % Na + 0,46% K ;
 ▲ G011 : 0,32 % Si + 0,005% Li + 0,102% K]
 [Conditions expérimentales : Fil massif $\varnothing \approx 1,2$ mm ; $D_g = 20$ l/mn]

Fil à taux élevé de silicium

Les deux derniers fils étudiés [Cf. Figure VI.21] contiennent un taux de silicium plus élevé : le fil G11 en contient un taux comparable à celui du 70 S (0,32%), avec les mêmes alcalins que le fil G010. Le fil Mégafil contient les trois alcalins étudiés précédemment, et un fort taux de silicium (0,8%).

Si les performances de ces deux fils sont un peu plus faibles que celles du fil G010 (transition à 50% de CO₂ sous 260 A [Cf. Figure VI.20], ils présentent tout de même une amélioration considérable, en terme de transition, par rapport au fil de référence 70 S, puisqu'ils permettent d'obtenir le régime de pulvérisation axiale pour des taux de CO₂ supérieur à 50% sous des courants de 330 A (pour le Mégafil) à 410 A (pour le G011).

4. CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES

Dans son étude avec fil fourré de type 70 S sous 330 A, S.Zielinska [1]. avait remarqué que l'ajout d'une très faible proportion de dioxyde de carbone dans le gaz de soudage (moins de 0,8%) provoquait une importante chute de la tension d'arc moyenne et une légère augmentation de la longueur d'arc. L'ajout progressif de CO₂ dans le gaz de protection se traduisait ensuite par une augmentation régulière de la tension d'arc, la transition du régime de pulvérisation axiale vers le régime globulaire semblant se produire lorsque la tension d'arc reprenait sa valeur sous argon pur.

Nous avons repris cette étude en tentant de corréler pour les différents fils étudiés, la tension et la longueur d'arc au régime de transfert. La mesure de la fréquence de détachement des gouttes a pu être réalisée pour la majorité des fils, fournissant une indication précieuse sur les caractéristiques du transfert de métal. Outre la nature de l'électrode, les variables retenues pour cette étude sont le courant d'arc et le type de gaz de protection.

4.1. Etude de l'influence du courant sur chute de tension pour le fil 70 S

La tension d'arc a été mesurée en fonction du taux de CO₂ (de 0 à 15,4%) dans le gaz de protection pour des courants d'arc variant de 200 à 410 A [Cf. Figure VI.22 et Figure VI.23] :

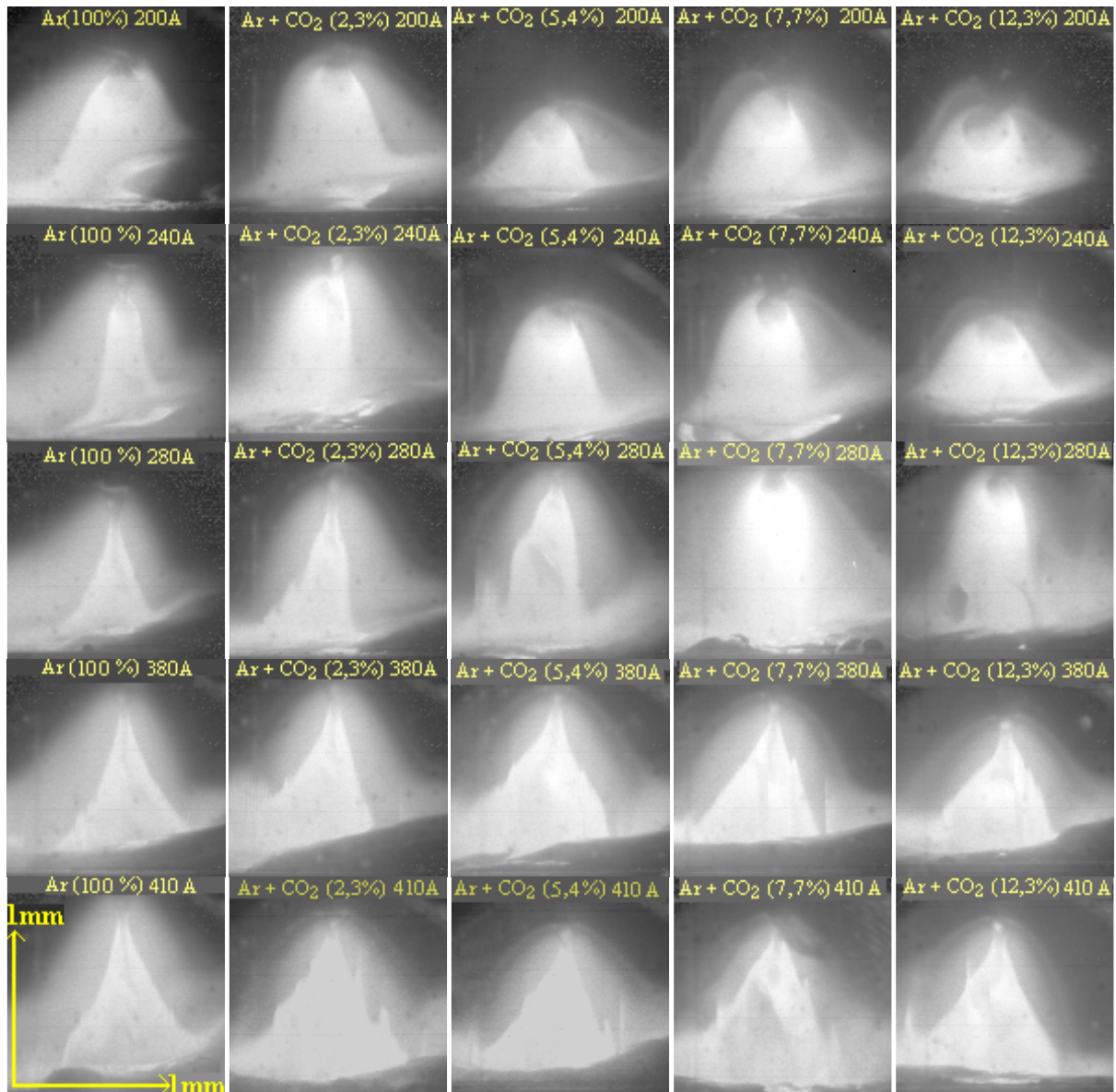


Figure VI.22 : Evolution de l'arc en fonction du taux de CO₂ pour différents courants – Fil 70 S
[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S, $\varnothing \approx 1,2$ mm ; $D_g = 20$ l/mn]

- Sous 200 ampères, le transfert est toujours globulaire, quelle que soit la proportion de CO₂ introduite dans le gaz de protection. La tension d'arc reste alors quasiment constante.
- Pour un courant de 240 ampères, la tendance est peu marquée et la chute de tension, si elle existe, reste faible (de l'ordre de 1,6 V) pour une tension d'arc relativement faible. Il faut noter que sous ces conditions de fonctionnement, il n'y a pas de changement de régime lorsque le taux de CO₂ augmente: le transfert est proche de la transition dans l'argon pur, et purement globulaire en mélange Ar-CO₂.
- Le comportement est semblable sous 280 A, avec un régime proche de la transition sous argon pur et globulaire dès ajout de dioxyde de carbone. La tension d'arc est globalement plus élevée, mais il existe une chute de tension plus marquée ($\approx 2,2$ V) dès l'ajout d'une faible proportion de CO₂ dans l'argon.

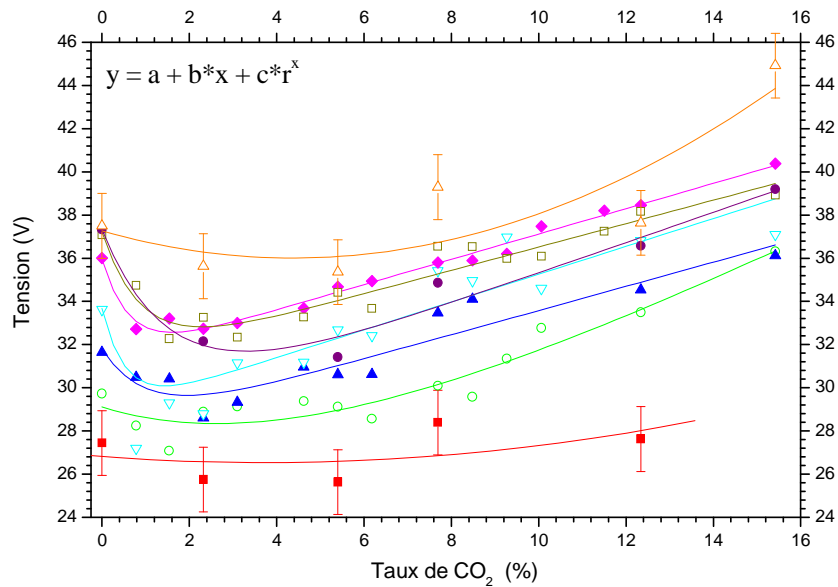


Figure VI.23 : Evolution de la tension d'arc en fonction du taux de CO₂ pour différents courants
 [Courant d'arc : ■ 200 A ; ○ 240 A ; ▲ 280 A ; ▼ 300 A ; ◆ 330 A ; □ 360 A ; ● 380 A ; △ 410 A]
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S Ø ≈ 1,2 mm ; D_g = 20 l/mn]

- Pour les courants plus élevée, l'ajout d'une faible quantité de CO₂ se traduit systématiquement par une chute de la tension d'arc, qui augmente ensuite progressivement avec le taux de CO₂. La comparaison du taux de CO₂ pour laquelle la tension d'arc retrouve sa valeur sous argon pur, avec le taux correspondant à la transition pulvérisation axiale-globulaire [Cf. Tableau VI.6 et Figure VI.24] montre qu'il existe une très bonne corrélation entre ces deux phénomènes.

Il faut noter que, pour le soudage sous 410 A, le régime reste de type pulvérisation axiale dans toute la plage de variation choisie : le passage en régime globulaire requiert des taux de CO₂ supérieurs à 17%, même si pour un taux supérieur à 15% la transition commence à s'amorcer.

Courant d'arc [A]	200	240	280	300	330	360	380	410
Tension d'arc sous argon [V]	≈ 27,4	≈ 29,7	≈ 31,6	≈ 33,62	≈ 36,01	≈ 37,09	≈ 37,33	≈ 37,5
Chute de tension à faible taux de CO ₂ [V]	/	≈ 1,6	≈ 2,2	≈ 4,82	≈ 3,27	≈ 5,9	≈ 5,9	≈ 2
Taux de CO ₂ correspondant à la tension sous argon pur [%]	/	/	≈ 5,0	≈ 6,8	≈ 8,7 8.8[1]	≈ 11,3	≈ 13,6	≈ 10
Taux de CO ₂ correspondant à la transition de régime [%]	/	/	≈ 0	≈ 7,7 (ss 305 A)	≈ 9,7 ≈ 10 [1]	≈ 12,3	≈ 14,52	≈ 17,1

Tableau VI.6 : Evolution de la tension d'arc pour différents courants de soudage
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S Ø ≈ 1,2 mm ; D_g = 20 l/mn]

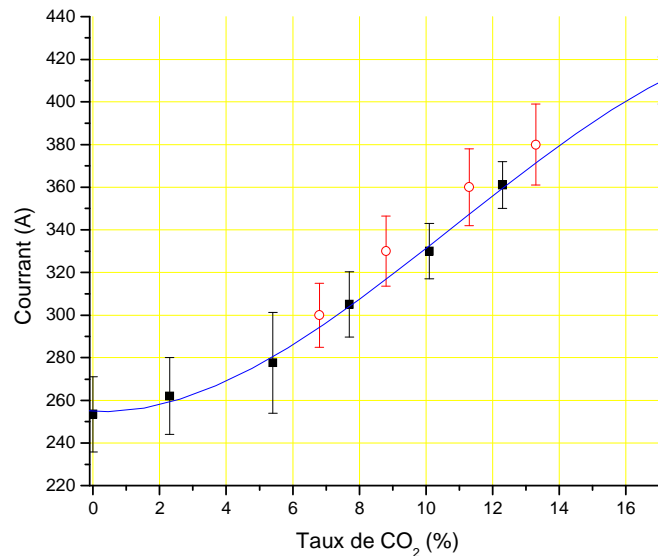


Figure VI.24 : Graphe Courant-CO₂ donnant les valeurs de la transition vers le régime globulaire (■) et les points pour lesquels la tension repasse par sa valeur sous argon (○)
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S Ø ≈ 1,2 mm ; D_g = 20 l/mn]

L'ajout de CO₂, qui provoque une augmentation de la résistivité du plasma dans les zones périphériques 'froides' de la colonne de plasma (voir chapitre VIII), mais également de la température de l'arc se traduit par une fusion plus rapide du fil et donc, à courant et vitesse-fil donnés, par un allongement de l'arc, parfaitement visible sous forts taux de CO₂, notamment en régime globulaire [Cf. Figure VI.22]. Cet allongement, couplé à la modification de résistivité électrique du milieu plasmagène, est clairement responsable de l'augmentation de la tension d'arc [Cf. Figure VI.25]. En particulier, la conductivité électrique du fil métallique est plus élevée que celle du plasma. Or, pour une même distance entre le tube-contact et la pièce, la longueur libre de l'électrode sera d'autant plus courte que l'arc sera plus long. Par conséquent, un allongement de la colonne d'arc se traduira par une augmentation de la résistance entre le tube-contact et la pièce métallique, et donc par une augmentation de la tension d'arc à courant constant.

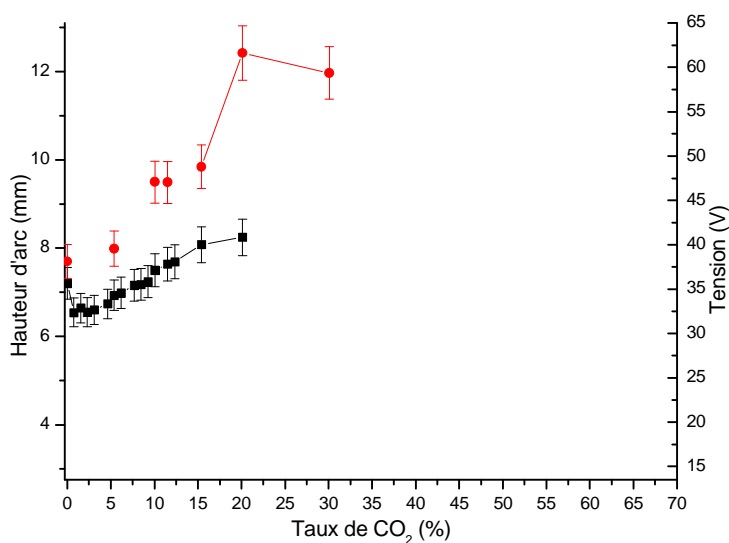


Figure VI.25 : Evolution de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc en fonction du taux de CO₂
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; I = 330 A, V_{fil} = 9 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

Néanmoins, pour des taux de CO₂ inférieurs à 8%, la longueur d'arc évolue peu et ne suffit pas à expliquer la chute de tension observée (qui devrait alors se traduire par un raccourcissement de la colonne !).

Les études spectroscopiques présentées ultérieurement (Cf. chapitre VIII), indiquent que l'ajout d'une très faible quantité de dioxyde de carbone au gaz plasmagène se traduisait par un enrichissement du plasma en vapeurs métalliques et à une augmentation de sa conductivité électrique : la chute de tension observée en est une conséquence.

D'après les résultats de S.Zielinska [1], qui a montré que le passage en régime globulaire s'accompagnait de la formation d'une couche isolante à la surface de la goutte (voir le chapitre VII), il est probable que l'accroissement de CO₂ dans le gaz de protection se traduise par la formation à l'extrémité du fil-anode d'une 'gangue' dont l'épaisseur augmente progressivement. Cette couche isolante provoque non seulement une augmentation de la tension proportionnelle à son épaisseur, mais également, en empêchant les gouttes de se détacher et en perturbant le passage du courant à l'extrémité de l'électrode, la transition progressive vers le régime globulaire.

Au passage de la tension par sa valeur sous argon la gangue constitue une barrière suffisamment importante pour que l'effet du CO₂ sur la conductivité du plasma soit compensé.

L'écart observé entre les deux valeurs (le taux de CO₂ du passage de la tension à sa valeur sous argon est un peu plus faible que celui correspondant à la transition) peut être expliqué par l'allongement de l'arc, qui vient se superposer au précédent effet.

4.2. Etude des autres fils massifs

Pour mettre en évidence les conditions de la transition, la courbe de la fréquence de détachement des gouttes est tracée à côté du graphe donnant la tension et la hauteur d'arc en fonction du taux de CO₂, lorsque les données sont disponibles. Une valeur inférieure à 250 Hz indique que le transfert se fait en régime globulaire, les points éventuels correspondant au transfert répulsif (mode globulaire pouvant conserver une fréquence supérieure) sont indiqués sur le graphe.

i. Fils ayant un taux faible de silicium

Les résultats sont présentés pour le fil AS 26 [Cf. Figure VI.26]. La chute de tension est peu marquée pour un faible taux de CO₂, principalement en raison de la valeur déjà réduite sous argon pur (32 V contre 36 V pour le fil massif 70 S de référence). La longueur d'arc est également nettement plus faible ($\approx 5,7$ mm, à comparer aux 7,7 mm observés avec le fil de référence), peut-être du fait d'une résistance électrique plus faible du fil-électrode. En effet la résistance linéique du fil AS 26 vaut les deux tiers de celles du fil 70 S. La fusion du fil sous l'action de l'effet Joule impose la valeur de la résistance électrique de la portion de l'électrode comprise entre le tube-contact et le plasma. Pour une résistance électrique plus faible, la longueur de cette portion doit être plus importante, donc pour une même distance entre le tube-contact et la pièce la longueur de l'arc est moindre. Comme le plasma est moins conducteur que le fil, la résistance globale est réduite et la tension est plus faible. Lorsque du CO₂ est ajouté la longueur de l'arc augmente rapidement et suit l'évolution de la tension. L'allongement plus important de l'arc peut donc compenser l'effet des vapeurs métalliques et réduire la chute de tension due à l'ajout de ce gaz. L'effet de la gangue est minoritaire, le transfert se faisant par pulvérisation axiale pour un taux de CO₂ inférieur à 25%.

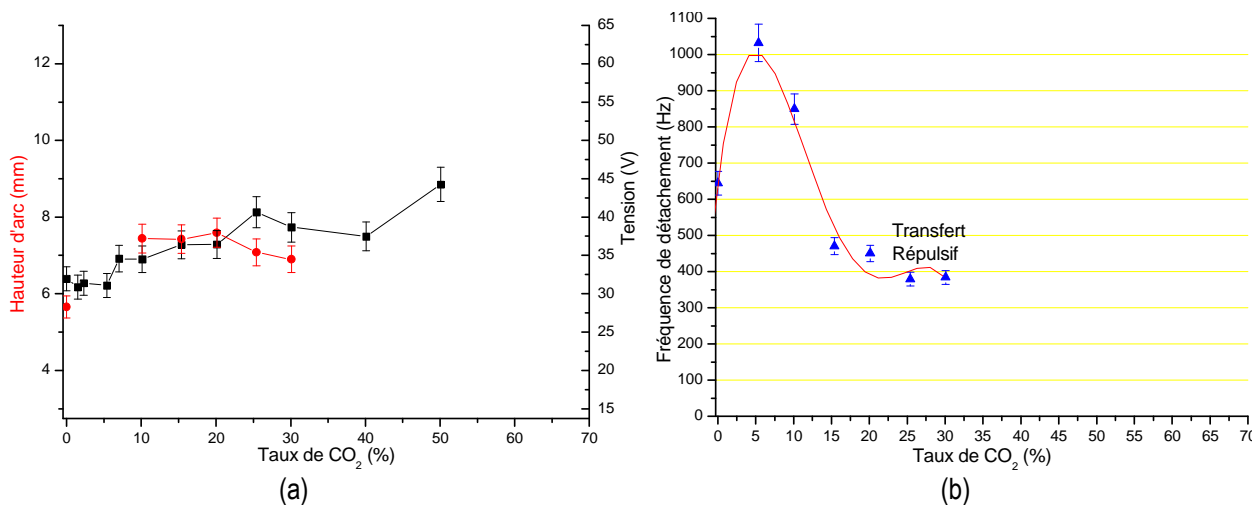


Figure VI.26 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes

[Conditions expérimentales : Fil massif AS 26; $I = 330$ A, $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

ii. Fils contenant du titane

Pour les fils contenant du titane, la valeur de la tension sous argon pur est particulièrement faible (29 V contre 36 V pour le fil 70 S). Dans ces conditions, non seulement une faible adjonction de CO₂ ne provoque pas de chute de tension, mais au contraire une rapide augmentation [Cf. Figure VI.27_a et Figure VI.27_b] parfaitement corrélée à l'allongement de l'arc. Cette tendance est particulièrement nette pour le fil AS 42 (0,3% Ti).

On peut supposer que sous argon, la faible tension observée (29 V pour une longueur d'arc de 6,5 mm) est due aux vapeurs de titane qui augmenteraient la conductivité électrique du plasma. Cet effet serait réduit lors de l'ajout de CO₂. Les mesures spectroscopiques présentées plus loin (Section

VIII.3.4) montrent en effet que pour un taux de 5% de CO₂ la densité électronique est similaire à celle observée pour le fil de référence 70 S. La conductivité du plasma diminuerait donc plus rapidement avec l'ajout de CO₂, ce qui expliquerait l'augmentation importante de la tension. Pour expliquer la disparition de l'effet du titane, on peut évoquer des réactions d'oxydoréductions dans le plasma entre le titane et l'oxygène issu de la dissociation du CO₂. Il peut également se produire une rétention du titane sous forme d'oxydes dans les gouttes de métal. Pour un taux de 10% de CO₂, la gangue est suffisamment épaisse pour provoquer la transition vers le régime globulaire. L'allongement important de l'arc contribue à augmenter la tension.

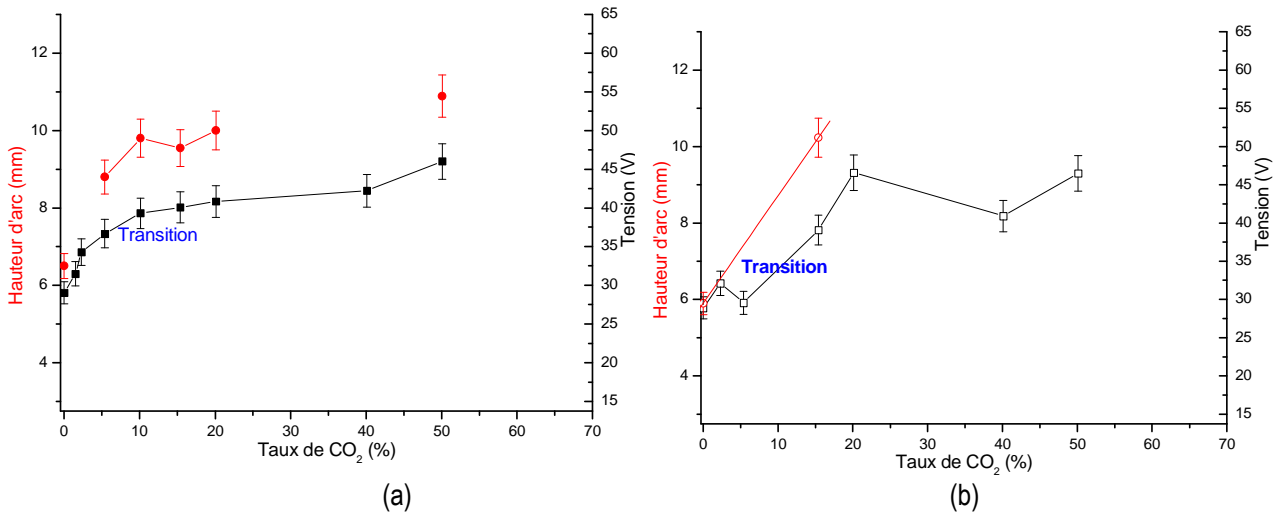


Figure VI.27 : Evolution en fonction du taux de CO₂ de la tension (■, □) et de la hauteur (●, ○) d'arc – Fils 'Titane'
 [(a) : symboles pleins : fil AS 42 ; (b) symboles vides : Fil S₂MoTi]
 [Conditions expérimentales : Fils massifs ; I = 330 A, V_{fil} = 9 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

iii. Conclusion

Pour les deux types de compositions étudiées le comportement est différent de celui observé pour fil de référence. Pour les fils à faible taux de silicium, la valeur de la tension sous argon est dépassée pour un faible taux de CO₂ (de l'ordre de 6%). Pourtant la transition vers le régime globulaire est obtenue pour un taux de CO₂ de l'ordre de 25%. Pour les fils contenant du titane, la tension présente une augmentation continue en fonction du taux de CO₂, indépendamment du régime de transfert. On peut supposer que la corrélation entre le régime de soudage et la tension, observée pour le fil de référence, est le résultat d'un certain équilibre entre les différents paramètres (conductivité des vapeurs métalliques, résistance électrique du fil-électrode).

4.3. Etude de fils fourrés

Dans le cas des fils fourrés, pour lesquels la transition est généralement observée pour des taux de CO₂ plus importants qu'en fils fourrés, la tension ne présente pas la chute caractéristique observée avec le fil 70 S. Pourtant la longueur d'arc est, sous argon, comparable à celle observée pour le fil 70 S, sauf pour le fil au zirconium G005. Ce comportement est très certainement lié à la structure spécifique des fils fourrés, qui modifie ses conductivités électrique et thermique, ainsi que la quantité de vapeurs métalliques libérées dans le plasma.

i. Fils ayant un taux faible de silicium

Pour les fils à bas taux de silicium (G002 et G004) la tension augmente continûment en fonction du taux de CO₂ [Cf. Figure VI.28 et Figure VI.29]. Cette augmentation accompagne, pour les taux les plus faibles, celle de la longueur d'arc. Cette dernière diminue ensuite sans que cela n'empêche l'augmentation de la tension.

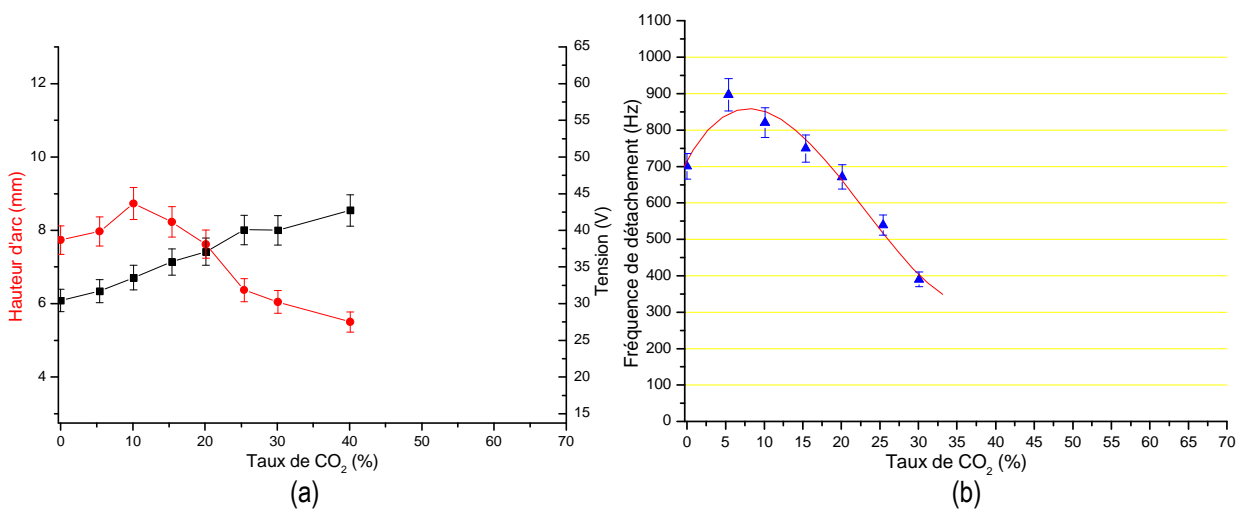


Figure VI.28 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré 'bas silicium' G002
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

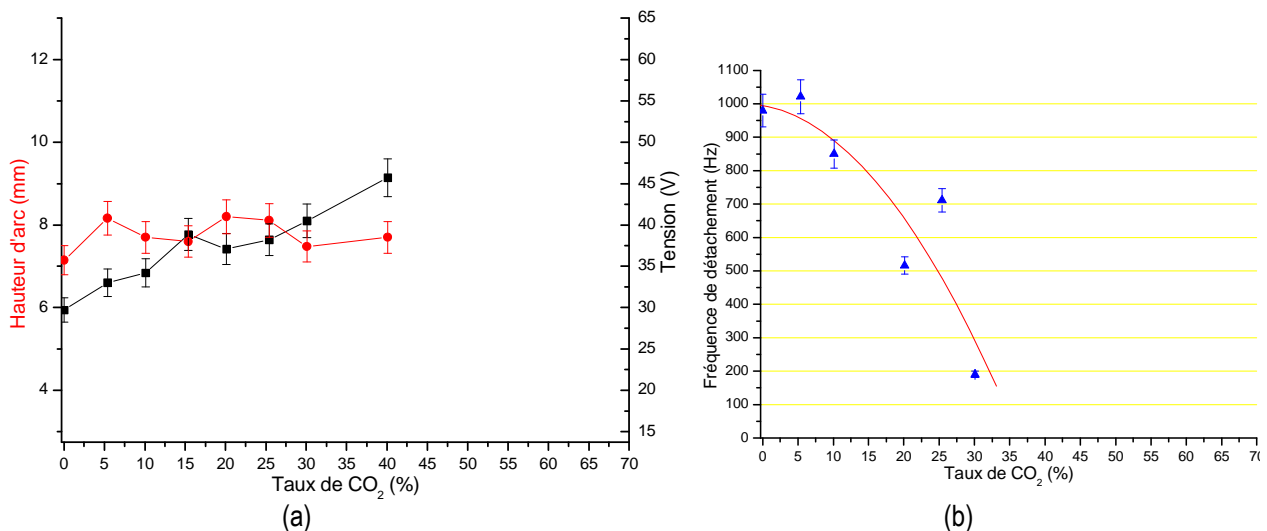


Figure VI.29 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré 'bas silicium' G004
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

ii. Fils contenant des éléments susceptibles de former des oxydes conducteurs

Le comportement observé pour les fils massifs contenant du titane [Cf. Figure VI.27], est confirmé pour le fil fourré G003 (1% Ti), avec une tension sous argon encore plus faible (26,5 V). La corrélation avec la hauteur d'arc est moins marquée mais les courbes ont une allure similaire [Cf. Figure VI.30].

Pour le fil contenant du zirconium (G005), le comportement est encore plus marqué : la tension sous argon pur n'est que de 21,4 V, contre 29,7 V avec un ajout de 2,3% de CO₂. La tension suit l'évolution de la hauteur d'arc, avec, au-delà de 25% de CO₂ l'existence d'un plateau qui est probablement lié à la diminution de la hauteur d'arc.

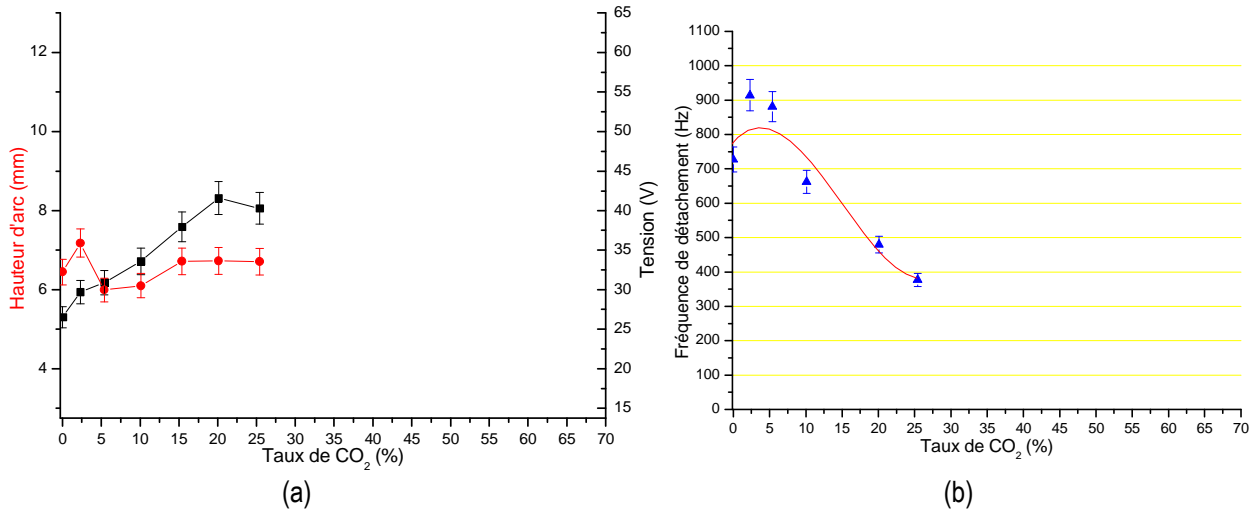


Figure VI.30 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré G003
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; I = 330 A, V_{fil} = 11,4 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

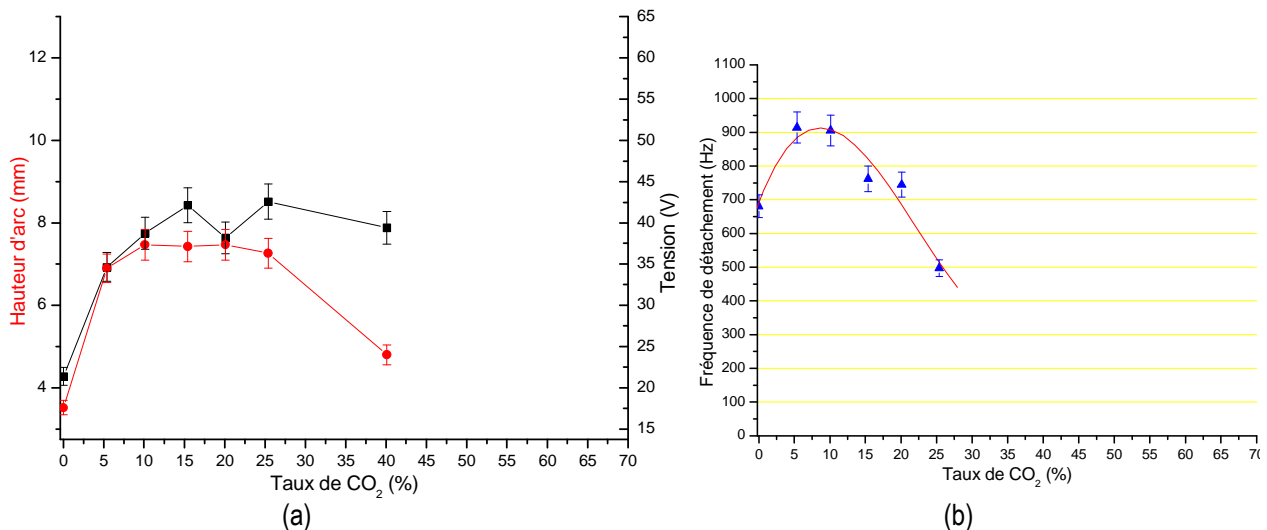


Figure VI.31 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré G005
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; I = 330 A, V_{fil} = 11,4 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

Pour le fil G006, contenant du zirconium et du lanthane, [Cf. Figure VI.32], le phénomène est moins marqué et la tension d'arc évolue peu avec le taux de CO₂. La hauteur d'arc reste sensiblement constante, avant de diminuer au-delà de 25% de CO₂ dans le gaz de protection.

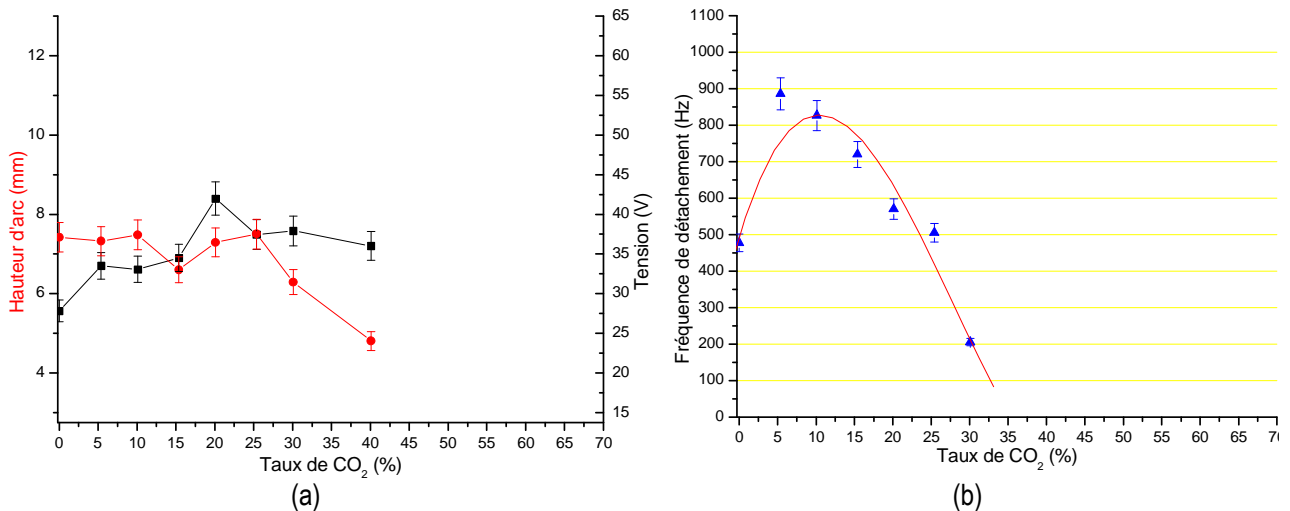


Figure VI.32 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré G006
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

iii. Fils contenant des alcalins

Les fils contenant des alcalins présentent généralement des limites de transition nettement plus élevée, en terme de taux de CO₂, que les fils précédents (à part le fil G008 au sodium).

a/ Fil ayant un taux faible de silicium

Pour le fil G007 au lithium [Cf. Figure VI.33], la tension augmente en fonction du taux de CO₂, alors que la hauteur d'arc évolue peu.

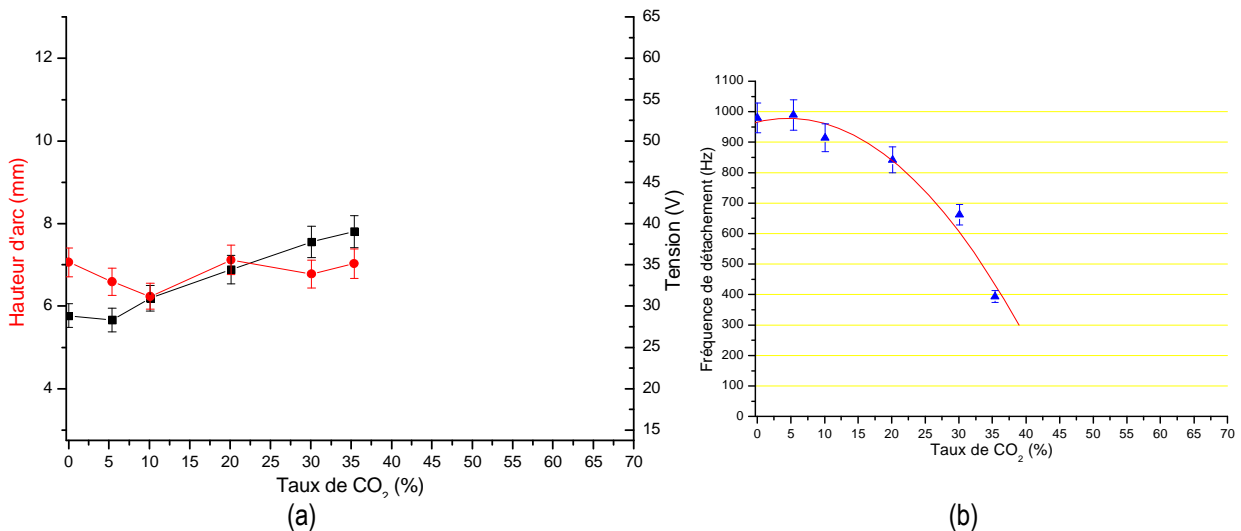


Figure VI.33 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré 'alcalin' G007
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

Le fil G008 contenant du sodium [Cf. Figure VI.34] présente un comportement semblable à celui des fils contenant du titane ou du zirconium, avec cependant une tension sous argon plus importante (30 V). La hauteur d'arc et la tension augmentent fortement avec l'ajout d'un faible taux de CO₂, puis les courbes présentent un palier au-delà d'un taux de 5%.

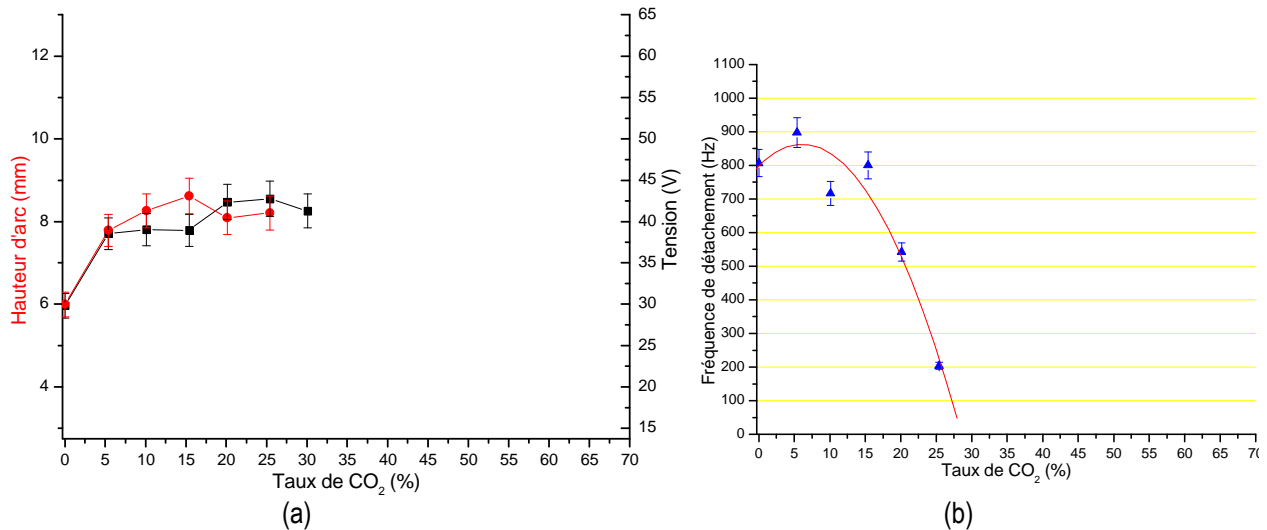


Figure VI.34 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré 'alcalin' G008
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

Le fil G009 contenant du potassium [Cf. Figure VI.35] présente un comportement intermédiaire, avec une augmentation de la tension suivie d'un pallier, mais avec une hauteur d'arc évoluant peu.

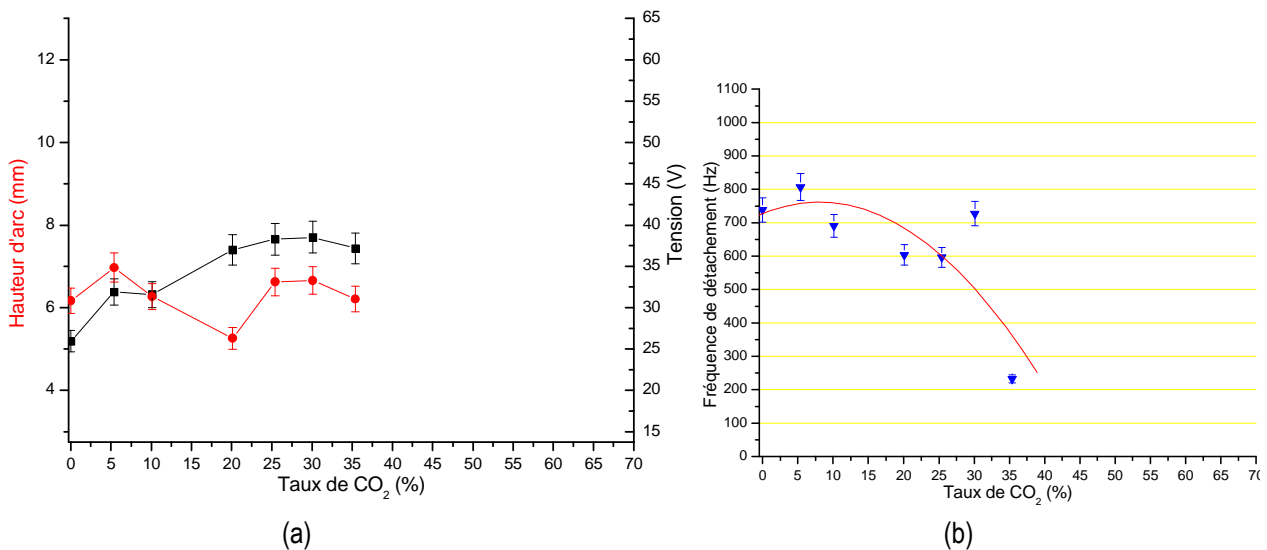


Figure VI.35 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré 'alcalin' G009
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

b/ Fil ayant un taux élevé de silicium

Pour limiter les cas étudiés, seul le 'Mégafil', contenant les trois alcalins et un taux élevé de silicium, a été étudié [Cf. Figure VI.36]. L'ajout d'une faible proportion de CO₂ dans l'argon, se traduit par une chute de la tension d'arc, puis son augmentation progressive dès que le taux de CO₂ excède 5%. Au-delà de 12,5% de dioxyde de carbone, la hauteur d'arc diminue continûment.

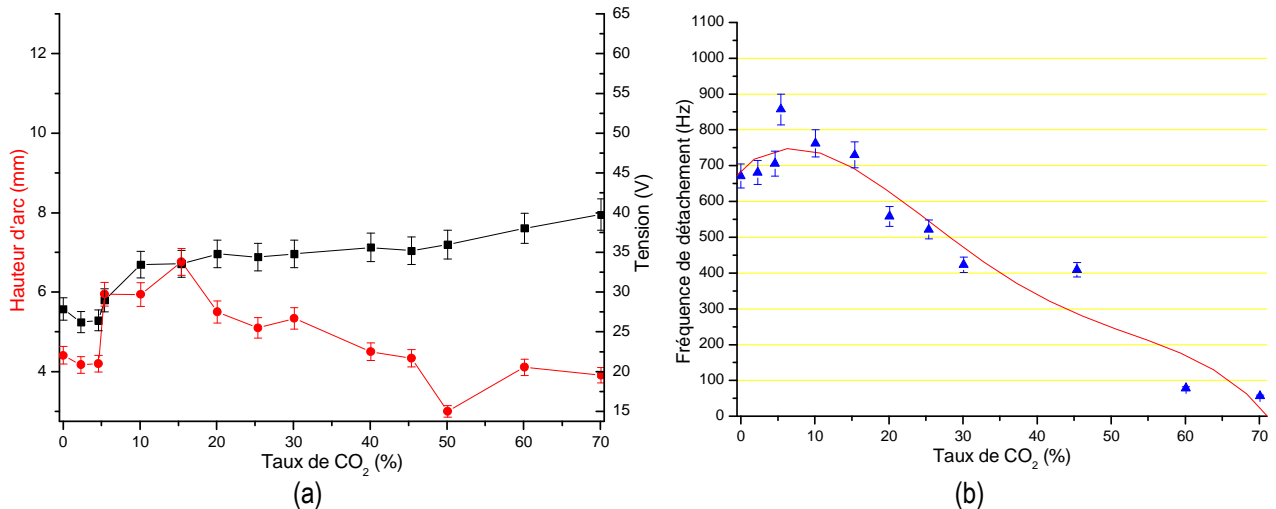


Figure VI.36 : Evolution en fonction du taux de CO₂ (a) : de la tension (■) et de la hauteur (●) d'arc ; (b) : de la fréquence de détachement (▲) des gouttes – Fil fourré 'Mégafil'
[Conditions expérimentales : Fil fourré ; I = 330 A, V_{fil} = 11,4 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

iv. Conclusion

Dans le cas des fils fourrés, s'il existe une chute de la tension d'arc dès l'ajout d'une faible proportion de dioxyde de carbone dans l'argon de protection, elle n'est pas détectable dans nos conditions de mesures. Cela peut être dû au fait que l'accrochage de l'arc est très différent de celui du fil massif, notamment parce que la partie conductrice de l'électrode, limitée au feuillard, est beaucoup plus réduite.

Néanmoins, les fils contenant du titane ou du zirconium présentent un comportement comparable à celui obtenu en fil massif. Ce résultat soutient l'hypothèse d'une action de ces éléments à l'interface électrode-plasma, qui se comporte de façon similaire (au moins en terme de conductivité électrique) indépendamment de la structure de l'électrode.

5. CONCLUSIONS

Les données obtenues à partir de l'observation de l'arc ont permis de déterminer le comportement de chacune des électrodes utilisées, qu'il s'agisse de fil fourré ou de fils massifs. Il a été possible de tracer des abaques donnant la position de la transition entre le régime globulaire et la pulvérisation axiale en fonction du courant et du taux de CO₂. Ces résultats correspondent au principal objectif de la thèse qui consistait à déterminer une composition de fil permettant d'obtenir le régime de pulvérisation axiale pour un taux de CO₂ supérieur à 50%. Pour trois des fils étudiés ce taux est dépassé, pour un courant de 330 ampères (pour les fils G011 et G012) et même dès 300 ampères pour le fil G010 contenant un mélange d'alcalins Li et K. Pour ce dernier la pulvérisation axiale a été observée pour un taux de CO₂ de plus de 60% pour le courant le plus élevé utilisé (410 ampères). Parmi les deux éléments présents dans ces fils (lithium et potassium pour les fils G010 et G011, lithium pour le G012) c'est le lithium qui présente les meilleures performances par rapport à la quantité introduite. Sa combinaison avec le potassium semble optimiser les performances.

Les travaux ont également mis en évidence l'influence du silicium dont la réduction de la concentration initiale permet d'améliorer sensiblement les performances du fil. Cependant sa présence est nécessaire à la réalisation d'un assemblage de qualité.

Pour ce qui est des éléments susceptibles de former des oxydes conducteur, seul le zirconium présente un effet sensible (il permet un ajout de 5 à 10% de CO₂ par rapport à un fil de même taux de silicium). Mais les performances sont nettement inférieures à celles des fils contenant des alcalins.

Dans tous les cas, les compositions testées restent des produits d'étude et une optimisation reste nécessaire pour obtenir un mélange utilisable industriellement. Ce travail relève d'une démarche de conception industrielle qui sortirait du cadre de l'étude réalisée. En particulier, l'étude systématique des viscosités des différents oxydes et mélanges sous forme fondue, serait nécessaire.

Les travaux réalisés ont été l'occasion d'étudier avec une certaine précision les caractéristiques géométriques in situ de l'électrode pour les différents régimes de soudage, avec une résolution de 10 µm. Les interfaces déterminées, entre le plasma et l'électrode, pourront être utilisées ultérieurement pour calculer le flux de courant traversant l'extrémité de l'électrode consommable.

Enfin, l'étude de l'évolution de la tension, corrélée avec celle de la longueur d'arc, a permis de vérifier le lien entre ces deux paramètres, pour les différentes conditions de soudage utilisées. L'étude de la structure microscopique et de la composition chimique de l'électrode, qui fait l'objet du chapitre suivant, permet de compléter l'ensemble de l'étude de l'électrode fusible utilisée en soudage MIG-MAG.

VII - ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE DE L'ANODE FUSIBLE

1. INTRODUCTION

Si la microstructure du cordon de soudure est très souvent étudiée, celle de l'électrode fusible l'est beaucoup plus rarement par les différents auteurs ([59], [102]). Son étude est cependant très importante pour la compréhension des phénomènes liés au soudage.

L'extrémité du fil-anode consommable est prélevée à la fin des séquences de soudage pour être analysée. Après extinction de l'arc, l'alimentation en gaz se poursuit jusqu'à la fin de la temporisation « post-gaz » définie sur le poste à souder. L'hypothèse de base de l'étude est que la goutte solidifiée conserve une composition assez similaire à celle de la goutte fondue terminant le fil lors du processus de soudage. L'étude de la goutte est particulièrement importante, car c'est à ce niveau que s'accroche l'arc pendant le fonctionnement. On considère que le refroidissement de la goutte dans l'atmosphère de protection est suffisamment rapide pour être qualifié de trempe et qu'il ne modifie pas significativement les caractéristiques chimiques de la goutte. Pour décrire les différentes zones et structures présentes, on utilise la terminologie suivante [Cf. Figure VII.1] :

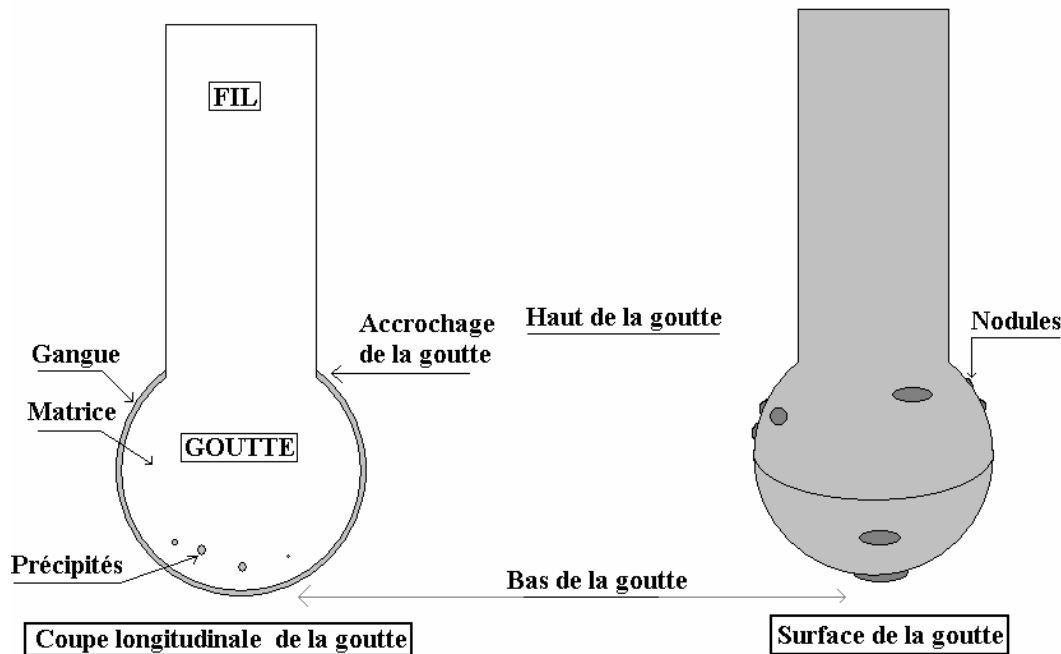


Figure VII.1 : représentation schématique des différentes parties de la goutte

- La goutte désigne la partie terminale du fil-anode. Elle est généralement sphérique, mais dans certains cas, pour les fils fourrés en particulier, elle peut être beaucoup plus irrégulière. Par convention, on considère la goutte dans sa position naturelle (comme lors du soudage) donc le haut (ou sommet) de la goutte désigne la partie liée au fil (accrochage de la goutte) et le bas l'extrémité inférieure en contact avec le plasma.
- La gangue désigne une couche d'oxydes pouvant recouvrir la goutte. Sa présence dépend des conditions de soudage. Sa composition et sa structure ont une importance particulière pour le processus de soudage. Son étude détaillée est réalisée dans le dernier paragraphe.
- Les précipités sont des zones où les éléments minoritaires de l'acier, sous forme d'oxydes, se concentrent. Nous retenons ce vocabulaire des métallurgistes (plutôt que le terme d'inclusion) même si ces zones sont souvent enrichies en oxygène par rapport au fil non traité, du fait de l'interaction avec le gaz. Ils sont disséminés dans la masse de la goutte et pour la majorité des fils, se situent à sa périphérie. Leur forme est généralement sphérique : ils apparaissent comme

circulaires sur la section polie de la goutte. Dans certains cas cependant les précipités ont une forme ne correspondant pas à des figures géométriques régulières.

- Les nodules sont des structures hémisphériques plus ou moins aplaties quelque fois présentes à la surface de la goutte, et composées essentiellement d'oxydes. Ils peuvent être associés à la gangue, mais leur composition est généralement différente de celle du reste de la couche d'oxyde couvrant le fil. Dans certains cas, ils constituent la seule structure oxydée présente.
- La matrice désigne le métal de base de la goutte, entourant les précipités et supportant la gangue à la périphérie.

Par analogie avec les procédés métallurgiques, on peut considérer que les précipités sont très probablement le résultat d'une démixtion, du fait de la perte de solubilité de l'oxygène dans le fer quand il est en trop grande quantité. Ce phénomène sera d'autant plus important à basse température. La forme plutôt sphérique de ces précipités permet de supposer qu'ils sont à l'état liquide lors du processus de soudage. La concentration parfois élevée des éléments minoritaires de l'acier dans ces précipités rappelle aussi le principe de la purification de zone des métallurgistes. La gangue observée autour des gouttes solidifiées est déjà présente à la surface de la goutte fondue. En effet on observe du fait de la différence de densité une ségrégation des oxydes qui « flottent » à la surface du métal fondu, ce qui est analogue à la présence d'un laitier en métallothermie de l'acier. Plusieurs caractéristiques observables sur les gouttes solidifiées supportent l'hypothèse d'une fusion de la gangue pendant le processus de soudage, mais c'est surtout l'étude par imagerie rapide qui apporte une preuve directe (voir le paragraphe 3 consacré à la gangue).

Dans le cas de la pulvérisation axiale les gouttes projetées sont de très faible diamètre. Le fil se prolonge par une partie fondue de plus en plus effilée qui passe d'un diamètre voisin de celui du fil (1,2 mm) au diamètre des gouttes (0,36 mm). A ce niveau la veine de métal fondu se sépare en petites gouttes qui sont projetées vers le cordon de soudure. Lorsque l'arc s'éteint, la partie fondue terminant le fil remonte pour donner forme à une goutte sous l'effet des tensions de surface. Dans ce cas, la morphologie observée à la trempe n'est pas représentative de la morphologie réelle du fil anode en cours de fonctionnement. Cependant on peut penser que l'extrémité de la goutte solidifiée correspond à la dernière goutte fondue qui était sur le point de se détacher.

Pour la transition entre la pulvérisation axiale et le régime globulaire, le diamètre de la goutte formée est proche de celui du fil. On peut considérer qu'il est suffisamment important pour que la goutte ne soit pas modifiée au cours du processus d'arrêt de l'arc et de solidification.

En régime globulaire on observe de grosses gouttes (jusqu'à plus de 2 mm de diamètre) à l'extrémité du fil au cours du soudage. La goutte solidifiée est très proche de celle fondue présente lors du fonctionnement.

Dans ces deux derniers cas, la structure observée est donc comparable à celle existant lorsque l'arc est allumé.

2. MESURES

2.1. Procédure des mesures

i. Prélèvement des extrémités de l'anode

La temporisation post-gaz est choisie de manière à couvrir au moins toute la durée d'incandescence de la goutte. L'autre paramètre important réglable au niveau du poste est la temporisation anti-collage. Elle définit le délai entre l'arrêt du dévidage du fil et l'extinction de l'arc. En effet cette dernière est très rapide comparée au retard entre la commande d'arrêt du dévidage et l'immobilisation effective du fil. Sans temporisation, le fil risquerait de toucher le bain de fusion du cordon, rendant impossible l'analyse de son extrémité. Cependant, la temporisation ne doit pas être trop importante car l'arc pourrait remonter jusqu'au tube-contact. La valeur choisie est de 0,08 à 0,1 s, la valeur la plus importante correspondant à la vitesse d'avance du fil la plus élevée.

ii. Polissage des échantillons

Afin d'étudier la morphologie des gouttes, les extrémités d'anodes sont prélevées puis polies suivant une coupe longitudinale selon l'axe du fil. On utilise une polisseuse (modèle « Mecapol P220S Presi »), constituée d'un plateau rotatif sur lequel on peut fixer des disques abrasifs de différents grains (marque « Mecaprex »). La machine est également équipée d'un dispositif d'apport d'eau. Compte tenu de la taille réduite des échantillons (quelques millimètres) on place ceux-ci à plat sur un support de polissage en acier inoxydable et on les enrobe dans une cire d'arcanson, de manière à usiner le fil jusqu'à son milieu. Le polissage et la coupe sont donc réalisés sur une même machine, avec différentes tailles de grain du papier abrasif (granulométrie de 120 μm à 5 μm). Un nettoyage aux ultrasons est réalisé à chaque changement de granulométrie. Le polissage avec le grain le plus fin se termine à l'alcool, afin d'obtenir un état de surface acceptable sans risquer une oxydation supplémentaire due à l'eau.

A l'issue du polissage les échantillons sont récupérés en chauffant la cire puis passés dans un solvant (acétone) pour éliminer les traces de cire résiduelle. Le nettoyage se fait dans une cuve à ultrason pour extraire plus efficacement la cire qui pourrait être présente dans des interstices du métal.

Les ultrasons sont cependant utilisés avec précaution lorsque des structures fragiles doivent être étudiées à la surface de la goutte. La gangue est en effet particulièrement fragile et peu adhérente dans certains cas.

Après le polissage des échantillons, ceux-ci sont rangés dans des petites boîtes individuelles fermées pour limiter leur oxydation, en attendant leur analyse.

Les échantillons sont observés avec un microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'un détecteur pour la spectroscopie par dispersion en énergie (EDS : Energy Dispersive Spectroscopy) des rayons X. Le dispositif d'imagerie du microscope possède deux modes, basés sur l'observation des électrons secondaires (SE : Secondary Electrons) et sur celle des électrons rétrodiffusés (BSE : Back Scattering Electron). Le premier mode fournit des images dont le contraste est lié à la topographie de l'échantillon, le second des images dont le contraste dépend de la composition chimique. L'EDS permet l'identification des éléments présents dans l'échantillon. L'observation au microscope fournit des informations précieuses, cependant il faut tenir compte des limitations suivantes :

Les éléments les plus légers (de l'hydrogène au béryllium) ne sont pas détectés.

La précision est limitée, surtout pour les éléments les plus légers détectables (carbone, oxygène..). Ainsi pour ces éléments, des variations de l'ordre de 1% ne sont pas significatives. C'est pourquoi on cherche seulement à mettre en évidence les différences les plus importantes entre les divers cas. Ce mode fournit plutôt des informations qualitatives, l'emploi d'une microsonde (microsonde de Castaing par exemple) étant nécessaire pour obtenir des valeurs précises à partir d'étalons.

L'identification des éléments nécessite une zone de mesure assez importante, pour que le résultat soit significatif. Pour des structures dont la taille est de l'ordre du micron, les éléments présents dans le voisinage seront aussi détectés. De même, si l'épaisseur est trop faible, le matériau sous-jacent sera aussi détecté.

Les proportions des différents éléments peuvent être exprimés en fonction du rapport des masses (pourcentage massique) ou du rapport des quantités d'atomes (pourcentage atomique). Sauf mention contraire (notamment dans le cas de l'identification des phases), les concentrations sont exprimées dans ce qui suit en pourcentage massique.

2.2. Résultats expérimentaux

i. Etude des fils massifs

L'étude détaillée du fil de référence a été menée lors de travaux précédents. Les résultats sont présentés dans la thèse de S. Zielinska [1]. La présence d'une gangue riche en oxygène et concentrant les éléments minoritaires de l'acier (Si, Mn, Al) a été observée à la surface de la goutte dans les cas correspondant au régime globulaire et celui de court-circuit. Elle est présente pour un courant inférieur à 270 A sous argon pur et à partir de 15% de CO₂ quel que soit le courant. Le taux d'oxygène présent dépend directement de la nature du gaz de protection. En régime de pulvérisation axiale, par contre, la gangue n'a pas été observée.

Les précipités sont surtout présents pour un taux de CO₂ élevé et les éléments minoritaires s'y concentrent dans des proportions qui peuvent être différentes de celles de la gangue.

Pour un courant donné, l'épaisseur de la gangue augmente avec le taux de CO₂ [Cf. Tableau VII.1]

CO ₂ (% vol)	0	5	15	20	40
e_g (μm)	0	0	3	10	30

Tableau VII.1 : épaisseur de la gangue e_g en fonction du gaz de protection à 330 A
[Conditions expérimentales : Fil 70 S ; $I = 330$ A, $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

De même, pour une composition du gaz de protection donnée, l'épaisseur de la gangue diminue avec l'augmentation du courant [Cf. Tableau VII.2].

Courant (A)	240	330	410
e_g (μm)	0 à 15	0 à 3	0 à 7

Tableau VII.2 : épaisseur de la gangue e_g en fonction du courant sous argon + 15% CO₂
[Conditions expérimentales : Fil 70 S ; argon + 15% CO₂ ; $D_g = 20$ l/mn]

Sous argon pur, pour 146 ampères (régime de court-circuits) l'épaisseur de la gangue peut dépasser 50 μm.

La gangue et les précipités sont généralement homogènes (à l'échelle des observations MEB de l'ordre du μm), mais dans certains cas on observe dans la matrice des dendrites où le taux de silicium est plus important, du fait de la cristallisation [Cf. Figure VII.2].

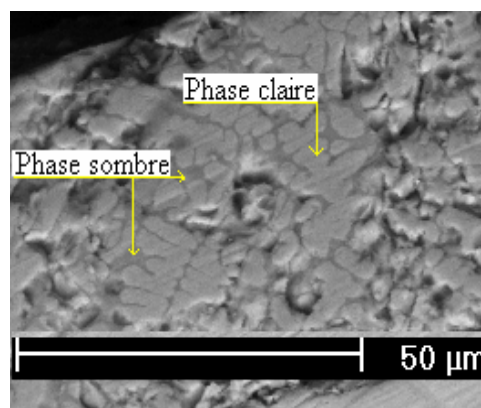


Figure VII.2 : Répartition en deux phases de la gangue pour le fil massif 70 S
[Conditions expérimentales : argon + 50% de CO₂, $I = 330$ A, $V_f = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

L'hypothèse qui a été formulée suite à l'analyse soignée du fil de référence dans différentes conditions expérimentales, est que la présence de la gangue est responsable de l'apparition du régime globulaire. L'augmentation de l'épaisseur de la gangue pour les forts taux de CO₂ s'explique par l'apport d'oxygène plus important, d'où une plus grande quantité d'oxydes. Dans la gangue et dans les précipités, le taux d'oxygène est élevé, de l'ordre de 30% (50% at.). La diminution de l'épaisseur avec le courant s'explique par une élévation de la température, permettant de vaporiser la gangue.

Deux mécanismes ont été évoqués, un effet électrique, en présence de cette gangue plus isolante que le fil, qui modifie la forme des lignes de courants et donc la force électromagnétique et un effet mécanique (variation de viscosité, de tension de surface avec l'enrichissement en oxygène) qui empêcherait le détachement des gouttes. Pour éviter le régime globulaire, on peut donc envisager soit d'agir sur la conductivité électrique, soit sur la température de fusion, soit sur les caractéristiques mécaniques. Nous avons entrepris de modifier la composition du fil anode afin de s'affranchir de la présence d'une gangue isolante. Le titane étant susceptible de former des oxydes conducteurs TiO₂, les deux fils contenant cet élément (AS 42 et G003) permettent d'étudier le premier mécanisme. Les propriétés de la silice (viscosité, haute résistivité électrique) font du silicium un élément favorisant le régime globulaire selon les deux hypothèses. Ainsi deux fils pauvres en silicium (AS 26 et AS 35) ont aussi fait l'objet d'une étude. Pour modifier la température de fusion du fil, une solution est d'y ajouter des fondants (éléments alcalins) mais une telle composition n'est pas disponible avec des fils massifs. Des fils fourrés en contenant ont été étudiés, les résultats sont présentés plus loin.

Pour chaque nouvelle composition de fils, une série d'expériences dans différentes conditions de courant et composition de gaz est réalisée. Compte tenu du nombre important de fils à tester, et du temps nécessaire aux analyses, tous les cas n'ont pu être étudiés. Les analyses et observations microscopiques sont menées prioritairement en présence d'une gangue, c'est-à-dire en régime globulaire ou à la limite de la transition avec la pulvérisation axiale. Les paramètres correspondant à cette transition, composition du gaz et courant, varient selon la nature des fils. Les cas correspondants aux modes les plus représentatifs pour le fil de référence 70 S sont particulièrement étudiés.

L'étude comporte l'observation microstructurale au MEB et des analyses chimiques (EDS) des coupes polies. Les fils testés se classent en deux catégories, en fonction de leur différence par rapport au fil de référence (l'analyse complète est donnée en Annexe E1) :

Les fils à bas taux de silicium AS 26 et AS 35 qui en contiennent respectivement 0,064% et 0,12% en pourcentage massique, le fil 70 S en contenant 0,35%.

Les fils contenant du titane AS 42 et S₂MoTi, respectivement 0,3% et 0,1%, le fil de référence 70 S en contenant une quantité à l'état de trace.

Comme dans chaque groupe on constate des similarités importantes entre les deux fils, un seul est traité en détail, l'autre étant évoqué de manière plus succincte.

a/ Soudage sous argon pour un courant de 146 A et une vitesse fil de 3,5 m/mn

Le transfert de métal se fait par court-circuits pour tous les fils testés. L'influence du titane n'étant pas évidente à ce niveau, ce sont les deux fils à bas taux de silicium qui ont été analysés dans cette configuration. Pour le fil de référence, les travaux précédents ont montré la présence d'une gangue épaisse de quelques dizaines de microns contenant peu d'oxygène.

Pour le fil le plus pauvre en silicium (AS 26 : 0,064% Si), la goutte est assez grosse (1,5 mm) mais la gangue est difficilement observable. Elle est fine (quelques microns) et on observe au MEB des microstructures en forme de plateaux [Cf. Figure VII.3] à la surface de la goutte. La surface des plateaux est composée d'oxydes de fer et d'aluminium (3% Al, 12% O, 81% Fe). Les précipités sont assez petits (5 µm) et peu nombreux, ils contiennent des oxydes (25% Si, 38% Mn, 27% O, 5% Fe).

Pour l'autre fil à bas taux de silicium (AS 35 : 0,12% Si), on observe également à l'extérieur de la goutte des microstructures en forme de plateaux, un peu plus étroites. La surface oxydée qui constitue la gangue subsistante (un arrachement a pu avoir lieu) est également fine (quelques microns, l'analyse n'a pu être réalisée car on détecte le fer de la matrice sous-jacente) et suit le profil de la goutte. Les précipités sont peu nombreux et de forme irrégulières, ils contiennent surtout des oxydes de fer et de silicium (10% Si, 1% Mn, 17% O, 68% Fe). La microstructure du corps de la goutte est variée et présente des porosités.

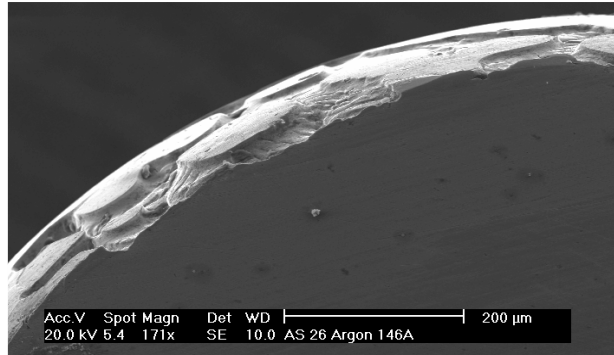


Figure VII.3 : Structure à la surface des fils à bas taux de silicium
[Conditions expérimentales : Fil AS 26 ; argon pur ; $I = 146A$; $V_{fil} = 3,5 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

On constate donc que l'abaissement du taux de silicium dans la composition du fil conduit à une nette diminution de la gangue. Même si on ne peut exclure la présence d'une structure plus épaisse n'ayant pas adhéré, sur les échantillons observés la gangue est très réduite. La goutte reste volumineuse et le régime est celui du court-circuit, mais dans ce cas il était attendu que la présence de la gangue ne soit pas la seule cause. En effet c'est surtout la valeur du courant qui est trop faible pour assurer le détachement de petites gouttes.

b/ Soudage sous argon + 15% CO₂ pour un courant de 240 A et une vitesse fil de 6,5 m/mn

Le transfert de métal se fait en régime globulaire. Les deux fils à bas silicium et un fil contenant du titane ont été étudiés dans cette configuration.

Pour les fils pauvres en silicium, peu de précipités sont visibles et la gangue est fine (quelques microns), elle est composée d'oxydes et de fer (1% Al, 86% Fe, 11% O). Les seules structures fortement oxydées sont les nodules [Cf. Figure VII.4]. Le reste de la surface de la goutte est peu oxydé et on observe une structure en forme de vaguelettes, surtout visible à l'accrochage de la goutte. Cependant, quelques structures fines, en plaques, situées en bas de la goutte, s'apparentent à la gangue observée dans les autres cas.

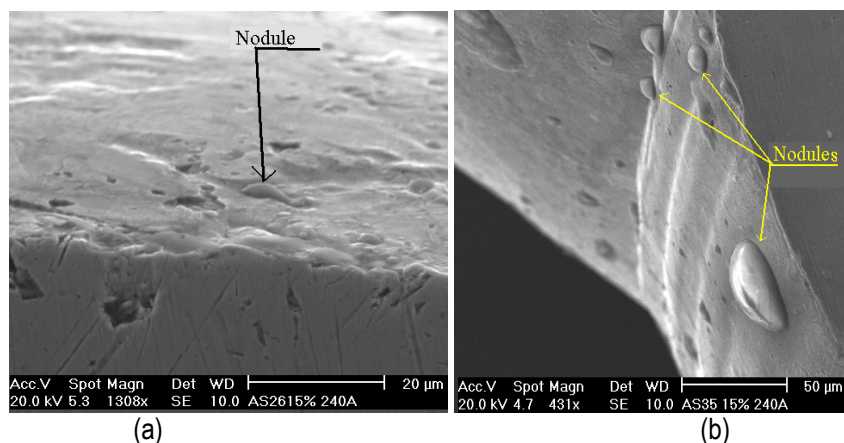


Figure VII.4 : Surface des gouttes pour les fils AS 26 (a) et AS 35 (b)
[Conditions expérimentales : Fils massifs ; argon + 15% CO₂ ; $I = 240A$; $V_{fil} = 6,5 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

Pour le fil le plus pauvre en silicium (AS 26 : 0,064% Si), le silicium est présent en faible quantité (moins de 1%). Les nodules sur le côté de la goutte [Cf. Figure VII.4_a] sont de taille réduite (moins de 10 μm) et de forme irrégulière.

Pour l'autre fil (AS 35 : 0,12% Si), on observe des nodules un peu plus gros (le plus important atteint environ 40 μm), et constitué d'oxydes (18% Si, 38% Mn, 27% O, 14% Fe), situés à l'accrochage de la goutte.

Pour le fil contenant du titane (S_2MoTi : 0,1% Ti), les précipités sont plus nombreux et leur taille est d'environ 10 μm [Cf. Figure VII.5].

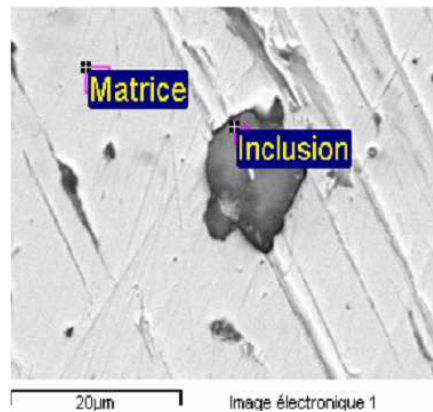


Figure VII.5 : Précipité d'oxydes dans la goutte

[Conditions expérimentales : Fil S_2MoTi ; argon + 15% CO_2 ; $I = 240\text{A}$; $V_{fil} = 6,5 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

Ils concentrent les éléments minoritaires comme le manganèse ou le silicium, ainsi que le titane. Sur trois pointés, les taux de fer, d'oxygène et de manganèse sont relativement constants, respectivement à 50%, 30% et 1%. Le taux de silicium varie de 1 à 4% et le titane de 1 à 2%. Les précipités sont plus nombreux vers l'extrémité de la goutte.

La gangue est fine mais des nodules sphériques contenant des oxydes sont présents sur la goutte, avec deux distributions de taille : de gros nodules de $25 \times 11 \mu\text{m}$ de haut et des petits de 3,5 μm de diamètre [Cf. Figure VII.6].

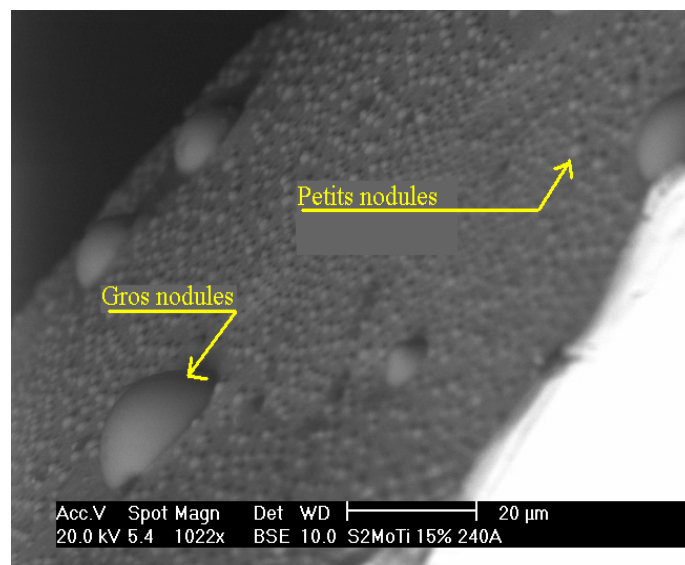


Figure VII.6 : Distribution des nodules à la surface de la goutte pour le fil massif S_2MoTi (0,1% Ti)
[Conditions expérimentales : argon + 15% CO_2 , $I = 240 \text{ A}$, $V_f = 6,5 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

On constate une évolution du taux de carbone en fonction du rayon : plus on s'éloigne de la périphérie de la goutte et plus il diminue : il passe de 12% à 11%, puis 5% et enfin à 3% à 90 µm du bord.

On constate que bien que le régime de transfert soit globulaire, les fils étudiés présentent une gangue peu importante, plus particulièrement pour le fil AS 26. Le titane est effectivement concentré à la surface du fil pour le fil S₂MoTi.

c/ Soudage sous argon + 15% CO₂ pour un courant de 330 A et une vitesse fil de 9 m/mn

Les quatre fils massifs ont été étudiés dans ces conditions. Pour le fil de référence, le transfert de métal se fait en régime globulaire. Par contre pour les fils à bas taux de silicium le mode de transfert est plus proche de la pulvérisation axiale. Le comportement des fils contenant du titane est plus proche de celui du fil de référence.

Pour le fil le plus pauvre en silicium (AS 26 : 0,064% Si), on observe des précipités contenant beaucoup de silicium (63% Si, 1% Mn, 24% C, 2% O 10% Fe), il peut s'agir de résidus de polissage ou d'un effet de concentration de l'élément par purification de zone.

On observe toujours les nodules contenant les oxydes avec des traces de cuivre (14% Si, 43% Mn, 23% O, 13% Fe, 1% Cu) à la base de la goutte. On constate que le taux de manganèse est élevé.

La gangue, très mince (0,2 µm), contient surtout un oxyde à base de fer (1% Si, 1% Mn, 16% O, 76% Fe).

Le carbone évolue peu par rapport au rayon de la goutte (de 1,5% vers le bord jusqu'à 0,5% à 90 µm ce qui représente une variation faible compte tenu des imprécisions).

Pour l'autre fil (AS 35 : 0,12% Si), la gangue est encore plus fine, voir inexistante. On observe toujours des vaguelettes à la base de la goutte, par contre on ne voit pas de nodules. On trouve des précipités contenant des oxydes, avec les mêmes éléments que dans les nodules : un premier de diamètre 5,5 µm contenant 23% Si, 41% Mn, 30% O, 5% Fe ainsi que S, Al..., un deuxième plus petit (diamètre = 3,5 µm) contenant 16% Si, 25% Mn, 23% O et 33% Fe. Ces oxydes peuvent être constitués d'un mélange des phases SiO₂, MnO et peut-être FeO, compte tenu du taux d'oxygène (de l'ordre de 50% en pourcentage atomique). Les précipités sont peu nombreux. On observe plus de silicium vers le bas de la goutte (2% Si) qu'au centre (< 1% Si), on peut penser qu'il commence à se concentrer vers la périphérie mais que son taux est trop faible pour contribuer à la formation d'une gangue.

Sur la surface externe de la goutte on trouve peu de nodules. On observe seulement quelques structures au niveau de l'accrochage de la goutte (au point d'inflexion entre le fil et le début de la goutte sphérique) et de petites plaques morcelées. La forme est plus irrégulière et les nodules sont plus étalés. En ce qui concerne la composition on observe divers oxydes dans les nodules : 16% Si, 23% Mn, 30% O et 27% Fe ; le reste de la surface analysée est majoritairement constitué d'oxydes à base de fer. Sur trois pointés en partant du bas de la goutte on a

<1% Si, 2% Mn, 18% O, 74% Fe (premier pointé) ;

<1% Si, <1% Mn, 5% O et 89% Fe (deuxième pointé à 200 µm du premier) ;

<1% Si, <1% Mn, 4% O et 90% Fe (troisième pointé à 100 µm du second)

Vers l'extrémité de la goutte le taux d'oxygène est plus élevé (pointé 1) et le manganèse est plus concentré que vers le milieu de la goutte (pointés 2 et 3). Ces analyses montrent l'enrichissement en oxygène en périphérie de la goutte, et révèlent une interaction avec le milieu extérieur. On retrouve des zones plus ou moins oxydées, la partie oxydée sur la droite de la Figure VII.7 présentant la forme caractéristique en bâtonnets.

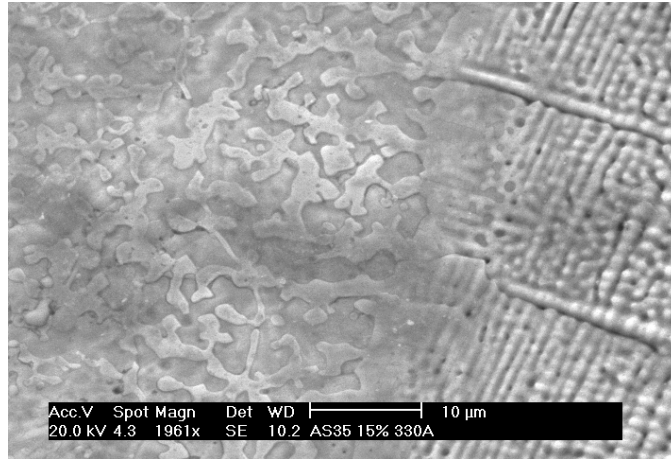


Figure VII.7 : Surface de la goutte, fil massif AS 35, régime globulaire
[Conditions expérimentales : argon + 15% CO₂, I = 330 A, V_f = 9 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

On constate que la gangue contient très peu de silicium et de manganèse (de l'ordre de 1%) ; les nodules et les précipités en contiennent en quantité importante. Il semble que la concentration (Si et Mn) soit plus élevée dans les précipités que dans les nodules, qui comme la gangue se situent à l'extérieur de la goutte. Pour le silicium en particulier, on passe de 15% (nodules) à 20% (précipités) environ. La différence est plus nette avec le fil AS 35.

On constate que le taux de manganèse est aussi élevé pour le fil AS 26 dans les précipités et même plus élevé dans les nodules que pour les autres fils. Pourtant le taux initial en manganèse de ce fil est le plus faible (0,40% contre 1% en moyenne) des 5 fils.

Pour le fil contenant du titane en faible quantité (S₂MoTi : 0,1% Ti), on observe les mêmes précipités que pour 240 A ainsi que les nodules contenant des oxydes. Du silicium est présent dans les précipités (23% Si, 16% O, 39% Fe). La gangue contient du silicium, du titane et beaucoup de calcium (<1% Si, <1% Mn, 42% O, 13% Fe, 13% Ca). Par contre on n'observe pas de nodules.

Pour le fil le plus riche en titane (AS 42 : 0,3% Ti) on observe des précipités contenant des oxydes (1% Si, 1% Ti, 1% Mn, 21% O, 52% Fe) concentrant les éléments minoritaires en faible quantité. L'analyse révèle également la présence de nodules dont certains sont plus larges et plus étalés que ceux décrits précédemment. On y trouve du silicium, du titane et du manganèse en proportions équivalentes, mais moindre que dans les autres fils.

La gangue contient surtout des oxydes de titane (1% Si, 42% Ti, 7% Mn, 43% O, 4% Fe) et son épaisseur est de 3,5 μm. Elle est située uniquement à la base de la goutte, tandis que les nodules sont observés à l'accrochage.

d/ Soudage sous argon + 15% CO₂ pour un courant de 410 A et une vitesse fil de 12 m/mn

Le fil de référence et les fils contenant du titane peuvent être décrits par un régime proche de la pulvérisation axiale, avec parfois un transfert répulsif de la veine de métal (voir le chapitre précédent). Par contre pour les fils à bas taux de silicium le transfert de métal se fait par pulvérisation axiale stable.

Pour le fil le plus pauvre en silicium (AS 26 : 0,064% Si), on n'observe pas de gangue, mis à part un nodule de 50 μm au bas de la goutte, contenant des oxydes (21% Si, 34% Mn, 33% O, 6% Fe). On observe de petits précipités de forme ronde (de diamètre 5 μm) contenant les mêmes éléments que le nodule (21% Si, 39% Mn, 29% O, 7% Fe). Un précipité de forme non sphérique (de 7,5 μm de long), riche en silicium (62% Si, 2% O, 17% Fe) a également été analysé.

La goutte principale présente sur son pourtour des gouttelettes secondaires de quelques dizaines de microns ayant adhéré. Une première a pour dimensions 30 µm de haut sur 80 µm de large dans l'axe du fil, une autre, orientée à 45° de l'axe du fil, mesure 175 µm de haut sur 146 µm de large.

Pour l'autre fil à bas silicium (AS 35 : 0,12% Si), on observe un seul nodule de forme assez régulière à l'extrémité du fil, contenant des oxydes (la position est inadaptée pour une analyse EDS). On ne trouve quasiment pas de précipités. Une zone est composée d'oxyde d'aluminium (55% Al et 36 % O), mais sans Si ou Mn. La surface de la goutte paraît régulière et n'est pas oxydée. On trouve des traces de cuivre. On peut penser que le fil a été moins altéré et que le cuivre s'est moins évaporé.

Pour le fil contenant du titane (AS 42 : 0,3% Ti), on observe à nouveau des nodules à l'accrochage et au bas de la goutte, de diamètre 1,5 à 2,5 µm. Ils contiennent les oxydes de fer, titane, manganèse, silicium (analyse pour trois d'entre eux : premier nodule : 5% Si, 8% Ti, 8% Mn, 25 O, 49% Fe, 1% Al ; deuxième nodules : 3% Si, 9% Ti, 6% Mn, 21% O, 56% Fe, 1% Al ; troisième nodule : 3% Si, 9% Ti, <1% Mn, 17% O, 68% Fe, 1% Al). On remarque que les proportions des éléments varient peu d'un nodule à l'autre. On observe une gangue répartie de manière continue composée essentiellement d'oxydes de titane et d'un peu d'aluminium (<1% Si, 49% Ti, 3% Mn, 43% O, <1% Fe, 5% Al). L'analyse est compatible avec la formation de TiO₂ (9% Ti pour 51% O en pourcentages massiques). Par endroit on observe des nodules larges dont l'aspect est proche de la gangue, ils contiennent plus de silicium et un peu d'aluminium (8% Si, 18% Ti, 17% Mn, 38% O, 15% Fe, 2% Al).

La taille des gouttes est légèrement supérieure au diamètre du fil (1,3 mm) ce qui est compatible avec le régime (début de transition vers le régime globulaire).

e/ Soudage sous argon + 20% CO₂ pour un courant de 330 A et une vitesse fil de 9 m/mn

Pour le fil le plus pauvre en silicium (AS 26 : 0,064% Si), le transfert s'effectue par pulvérisation axiale mais commence à se rapprocher de la transition. On observe sur la coupe polie quelques précipités de petit diamètre (1 à 2 µm) contenant de l'oxygène et du silicium. Une structure semblable à la gangue (mais non continue) peut être observée sur le côté de la goutte. Elle s'apparente à un nodule étalé, avec une concentration en silicium assez importante et une plus grande épaisseur (10 µm) que la gangue observée pour 15% de CO₂ (entre 1,5 et 2 µm). Elle est également constituée d'oxyde de fer (<1% Si, <1% Mn, 21% O, 65% Fe, 2% Al) compatible avec la stœchiométrie de FeO (34% Fe et 38% O en pourcentages massiques). On observe des précipités de forme circulaire, le taux de silicium et de manganèse (premier pointé : 14% Si, 35% Mn, 24% O, 23% Fe ; deuxième pointé : 15% Si, 35% Mn, 22% O, 24% Fe) y est voisin de celui relevé dans les nodules sous argon + 15% de CO₂.

L'analyse de la ligne de points de mesures montre un taux élevé de carbone près de la périphérie (11% C contre 2% C pour les autres points de mesure), mais on trouve également des impuretés (Na, Cl) donc cette mesure peut être faussée.

Pour l'autre fil à bas silicium le transfert est proche du régime globulaire. On observe également un précipité composé principalement d'oxygène et d'aluminium (52% Al, 34% O, 14% Fe). Un autre précipité de 2 µm de diamètre contient les autres oxydes (14% Si, 37% Mn, 19% O, 27% Fe). Les précipités de ce type sont peu nombreux et de petit diamètre (de l'ordre de 1 µm).

La surface extérieure de la goutte est recouverte par une gangue oxydée. La gangue présente trois couches : l'une, externe, contient des oxydes de fer et de manganèse (<1% Si, 3% Mn, 19% O, 74% Fe). La couche intermédiaire contient du fer oxydé (<1% Si, 58% Fe, 26% O, 11% C) et la couche de base du fer non oxydé (<1% Si, <1% Mn, 91% Fe, 8% C). On observe des reliefs entre lesquels la phase silicatée a coulé, formant des nodules larges et aplatis (Premier pointé : 17% Si, 35% Mn, 24% O, 22% Fe ; deuxième pointé : 15% Si, 25% Mn, 25% O, 22% Fe). La structure en vaguelette présente des creux remplis d'oxyde de fer et des bosses de fer non oxydé.

Pour le fil contenant du titane (S_2MoTi : 0,1%), le régime de transfert est globulaire. On observe une gangue peu épaisse (3 à 6 μm), les nodules sont présents en plus grand nombre, de même que les précipités. Ils contiennent du silicium, beaucoup de carbone mais peu de manganèse (on en trouve cependant dans la matrice) et un peu de titane (23% Si, <1% Ti, 15% O, 35% Fe, 22% C). La porosité est importante et des creux à la surface peuvent être chargés d'impuretés de polissage.

f/ Soudage sous fort taux de CO_2

Pour le fil à bas silicium, sous 50% de CO_2 à 240 ampères le transfert se fait en régime globulaire, on observe une gangue très épaisse (50 à 70 μm) et deux zones au centre de la goutte, contenant des oxydes. Les observations microstructurales de la gangue montrent des grains (plutôt que des bâtonnets) insérés dans une matrice. Les grains sont principalement constitués d'oxydes de fer avec un peu de manganèse (<1% Si, 16% O, 3% Mn, 79% Fe, 1% C) tandis que la matrice contient du silicium en plus grande quantité (8% Si, 18% O, 5% Mn, 67% Fe, 1.13% C). On trouve une série de précipités bien circulaires vers l'extrémité de la goutte, là où la gangue est la plus épaisse. Ils contiennent des oxydes (<1% Si, 17% O, 4% Mn, 76% Fe, 2% C). Le diamètre maximal est de 22 μm et on observe de nombreux autres précipités plus petits (quelques microns).

A 330 A, le transfert est toujours selon le régime globulaire et on observe des précipités de taille assez réduite (5 à 6 μm), parfois de forme allongée. Les précipités sont plus nombreux (on en compte 4 dans une région d'étude de 40 μm de côté) mais contiennent toujours les mêmes oxydes (21% Si, 25.02% O, 43% Mn, 7% Fe, 2% C).

La gangue contient des oxydes de fer avec des grains de forme caractéristique en bâtonnets (1% Si, 11% O, 6% Mn, 72% Fe, 10% C) dus à la cristallisation rapide lors du refroidissement. L'épaisseur n'est pas constante, on a des zones successives de forte épaisseur et de faible épaisseur. D'une manière générale la zone d'épaisseur maximale est située à l'extrémité de la goutte. L'épaisseur maximale est de 12 μm , l'épaisseur minimale de 2 μm . Par endroits on peut voir que la gangue commence à se décoller. On observe également des excroissances sur la gangue comme pour le fil AS 42 sous 40% de CO_2 à 330 A.

Pour le fil au titane (AS 42) à 40% CO_2 sous 330 A, le mode de transfert est le régime globulaire et on observe une gangue plus épaisse qu'à 15% de CO_2 (4 μm) présentant plusieurs paliers. On observe également une gouttelette de métal de base emprisonnée dans la gangue lors de son éjection [Cf. Figure VII.18, paragraphe 3.2]. Ses dimensions sont de 60 μm de hauteur pour un diamètre de 110 μm . La gangue contient des oxydes (6% Si, 14% Ti, 10% Mn, 32% O, 33% Fe, 1% Al), la gouttelette de métal sortant n'est pas oxydée (<1% Si, 1% Ti, 96% Fe, <1% Al).

Les précipités sont de forme irrégulière et contiennent de l'oxyde de silicium (Premier pointé : 28% Si, 1% Ti, <1% Mn, 26% O, 26% Fe ; deuxième pointé : 3% Si, 1% Ti, 31% O, 57% Fe).

g/ Conclusion

On vérifie que l'augmentation de la proportion de CO_2 dans le gaz de protection conduit à un plus fort taux d'oxygène dans le métal, donc à une plus grande quantité d'oxydes. Ces oxydes se retrouvent dans la gangue ou les nodules et dans les précipités. On constate par ailleurs que c'est à la base de la goutte qu'on observe la plus grande quantité de nodules sphériques. Il semble que le taux d'oxygène dans les nodules varie peu et reste toujours élevé, entre 40% et 50%. Les phases oxydées concentrent les éléments mineurs des fils : en particulier le silicium, le manganèse, l'aluminium et le titane. Nous avons pu observer que les gouttes prêtes à être éjectées sont plutôt métalliques. Au niveau de la goutte, il s'opère donc une véritable purification du métal, tous les éléments mineurs se regroupant dans les précipités ou la gangue.

Influence de la concentration en silicium

On constate que pour les fils AS 26 et AS 35 on retrouve le silicium concentré dans les précipités ou les nodules, même si c'est en proportion un peu plus faible que pour le fil 70 S. Par contre, les nodules ou les précipités sont nettement plus petits (d'un facteur 5 à 10) et ils sont moins

nombreux. Par ailleurs, la gangue, quand elle est présente, contient très peu de silicium. Pour 15% de CO₂ le régime reste plus proche du spray, ce qui peut s'expliquer par la plus faible concentration en silice isolante.

Par contre, lorsque le taux de dioxyde de carbone est plus important (20% de CO₂ pour 330 A, 25% pour 410 A) la quantité d'oxygène contenue dans la croûte augmente et on repasse en régime globulaire. La quantité de silicium reste faible et on trouve donc surtout de l'oxyde de fer et de manganèse.

Régime de pulvérisation axiale

En régime de pulvérisation axiale, la gangue n'est généralement pas présente dans notre fil de référence 70 S, nous supposons ainsi que c'est la présence d'une gangue qui empêche d'atteindre ce mode de fonctionnement. Pour les fils à bas taux de silicium (AS 35 et AS 26), à 15% de CO₂ et 410 A on n'observe qu'un gros nodule à l'extrémité du fil. Il correspond probablement au rassemblement de tous les oxydes de surface. Le reste de la goutte n'est pas oxydé. Les autres fils présentent des nodules plus nombreux, mais pas de gangue bien définie.

Hypothèse sur les nodules

Les nodules semblent dans tous les cas être de nature proche de celle la gangue, avec une plus forte concentration en silicium. Ils sont présents en général lorsqu'une gangue continue n'est pas observée. On peut supposer que les nodules sont les prémices d'une gangue peu abondante, ou peu mouillante. La composition chimique des phases oxydées formées peut considérablement modifier les caractéristiques de mouillage et de tension de surface.

Substitution du titane au silicium

Pour les fils contenant du titane, en particulier l'AS 42 avec 0,3% Ti, on constate que les précipités concentrent du titane en proportion importante. Par contre, le taux de silicium est nettement plus bas que dans les précipités des autres fils. Si on fait la somme des taux de silicium et de titane, on obtient une valeur de l'ordre du taux de silicium pour les autres fils. On peut émettre l'hypothèse qu'une partie du silicium est remplacée par du titane, et ce également au niveau de la gangue.

Composition de la gangue

Il apparaît donc que la gangue peut être formée de plusieurs types d'oxydes (fer, silicium, titane, aluminium...) selon la composition du fil. On remarque par ailleurs que la concentration en silicium n'est pas toujours homogène dans la gangue.

La composition détermine les propriétés physiques, notamment la température de fusion (la silice fond à 1800°C soit une température plus élevée de 17% par rapport à la température de fusion du fer pur, et de 8% par rapport au titane pur), la mouillabilité de la phase liquide, et les propriétés électriques (conductivité des oxydes plus faible). Cependant les concentrations en silicium sont faibles. Si on passe de 1,5% à 0,3% dans le fil, on a effectivement un rapport 5, mais la variation par rapport à la concentration globale reste faible. Il faut donc confirmer qu'une si faible variation en valeur absolue suffit à expliquer les différences de comportement observées. En particulier, est-ce que l'abaissement du taux de silicium peut modifier l'accrochage de l'arc, qui se fait soit à la pointe du fil (pulvérisation axiale) soit en englobant la goutte terminant le fil (régime globulaire) ?

Bilan

Pour résumer, parmi les différents oxydes susceptibles de se former, le plus pénalisant semble être l'oxyde de silicium. Il empêche la transition vers la pulvérisation axiale à partir de 15% de CO₂ (limite à 410 A), contre 25% de CO₂ pour l'oxyde de fer et de manganèse avec très peu de silicium. L'ajout de titane fait baisser le taux de silicium dans les précipités et les nodules, donc on retrouve une situation proche des fils à bas silicium. Pour ces derniers fils (AS 26 et AS 35), la gangue est peu importante et contient très peu de silicium mais les précipités et les nodules en contiennent à

peu près autant que le fil de référence 70 S ; c'est leur nombre et leur taille qui diminue. Il existe donc une relation de cause à effet claire entre l'établissement d'une gangue continue et isolante par interaction du fil métallique avec l'atmosphère de protection, et le changement de régime globulaire/pulvérisation axiale. Plus on retarde l'apparition de cette gangue continue, par la modification de la composition des fils, et plus on préserve le régime de pulvérisation axiale à des courants bas et/ou des taux de CO₂ élevés.

ii. Etude des fils fourrés

L'étude entamée s'est prolongée avec les fils fourrés au-delà des limites imposées par les compositions disponibles en fil massif. Les électrodes étudiées se classent en trois catégories : les fils à bas silicium (G002 et G004), les fils contenant des éléments susceptibles de former des oxydes conducteurs (G003, G005 et G006) et les fils contenant des éléments susceptibles d'abaisser la température de fusion de l'électrode. La dernière catégorie se divise elle-même en deux sous-catégories, les fils avec fondant à bas taux de silicium (G007, G008, G009, G010 et G012) et les fils avec fondant à taux de silicium élevé (G012 et Mégafil710M).

L'étude de l'arc (chapitre VI) a montré que pour les fils fourrés, il a été possible d'obtenir la transition entre le régime globulaire et la pulvérisation axiale pour un taux de CO₂ très supérieur (60% pour le fil G010) à la limite observée pour le fil de référence. Pour limiter le nombre d'échantillons à traiter, les analyses sont réalisées seulement pour les cas les plus pertinents, pour chaque composition fil. L'étude du fil G002 a été réalisée dans le but de comparer le fonctionnement d'un fil fourré avec celui d'un fil massif (fil AS 26). En particulier, le comportement du flux est étudié pour savoir si la fusion de la goutte assure une homogénéité satisfaisante. Par ailleurs, il faut tenir compte du fait que le taux de silicium est inférieur (0,048% de Si au lieu de 0,064% de Si dans le fil massif).

a/ Validation des résultats : fils à bas taux de silicium

Soudage sous argon, $V_f = 11,4$ m/mn, $I = 330$ A

Le transfert se fait par pulvérisation axiale. On constate que du flux non fondu (correspondant à la zone granulaire visible au centre du fil) est présent jusqu'à environ 350 µm de l'extrémité de la goutte. D'après l'étude microstructurale, la surface est légèrement oxydée (11% O) avec une concentration du silicium (2 % Si) et surtout du manganèse (4% Mn) mais on ne distingue pas de gangue. La pointe du fil est assez irrégulière et ne présente pas de goutte sphérique à l'extrémité. On peut cependant considérer que la fusion est homogène sur la couche périphérique [Cf. Figure VII.8].

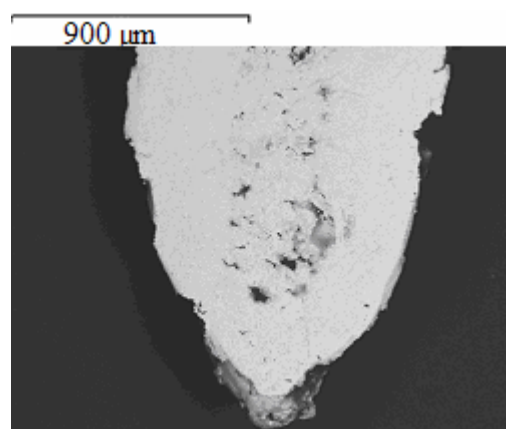


Figure VII.8 : Extrémité du fil fourré (G002) en pulvérisation axiale).
[Conditions expérimentales : argon pur, $I = 330$ A, $V_f = 11,4$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

Pour les autres fils fourrés, le comportement sous argon pur est le même que pour le fil fourré G002.

Soudage sous 10% CO₂ V_f = 11,4 m/mn, I = 330 A

Le transfert se fait par pulvérisation axiale. Le fil est terminé par une goutte d'un diamètre de 1,1 mm, d'une forme semblable à celle observée pour le fil massif. On observe cependant des nodules à l'extrémité de la goutte mais comme leur surface est constituée d'oxyde de fer, on peut supposer qu'il s'agit de gouttelettes ayant adhéré à la goutte plutôt que du métal non encore détaché [Cf. Figure VII.9]. Le diamètre de la goutte reste inférieur à celui du fil, le régime de transfert étant encore proche de la pulvérisation axiale. Le flux est peu visible car le plan de coupe est un peu au-dessus de l'axe du fil, mais il s'étend apparemment jusqu'au sommet de la goutte (limite d'accrochage) soit à 0,8 mm environ de l'extrémité.

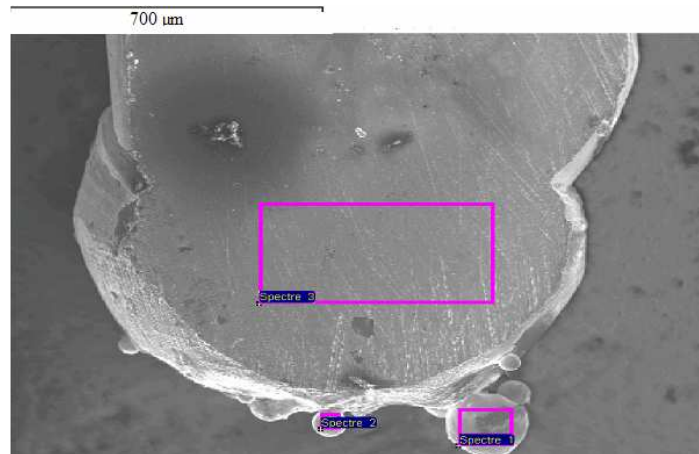


Figure VII.9 : Fil fourré G002, régime de pulvérisation axiale
[Conditions expérimentales : argon + 10% CO₂, I = 330 A, V_f = 11,4 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

A la surface on n'observe pas de gangue nette, seulement des zones isolées contenant du fer oxydé, avec peu de silicium. L'extrémité du fil est globalement peu oxydée, la goutte est irrégulière. Des précipités sont présents en faible quantité, pour l'un d'entre eux c'est l'aluminium qui est le composant principal. La taille des précipités est assez faible, de l'ordre de 5 microns. Dans tous les cas, le taux de silicium relevé est assez faible. Dans le cas du fil massif AS 26, si au niveau de la gangue la teneur en silicium était faible par contre les précipités en contenaient une proportion équivalente à ceux observés dans le fil de référence 70 S. Dans le cas du fil G002, la plus grande disparité des compositions peut être expliquée par la nature du fil fourré, qui est moins homogène que le fil massif. On trouve également des précipités à deux phases.

Soudage sous 15% CO₂ V_f = 15 m/mn, I = 410 A

Le transfert se fait par pulvérisation axiale. Une large cavité (1 mm de diamètre) occupe le centre de la goutte [Cf. Figure VII.10]. Elle est due au retrait lors du refroidissement, ce qui est indiqué par les structures en feuillets visibles sur les parois. Dans la matrice l'analyse ne révèle rien d'autre que le fer. La goutte atteint un diamètre de 2,6 mm, sa forme est sphérique mais sa surface est irrégulière. Comme pour le courant de 330 A, on n'observe pas de gangue complète entourant la goutte mais dans certaines zones une structure oxydée est visible. L'épaisseur atteint 25 µm environ et le métal oxydé concentre un peu de silicium et de manganèse (2% mass.). Au niveau de l'accrochage de la goutte ; on remarque une plus grande accumulation d'oxydes qui sont restés piégés dans le creux formé entre la goutte et le fil.

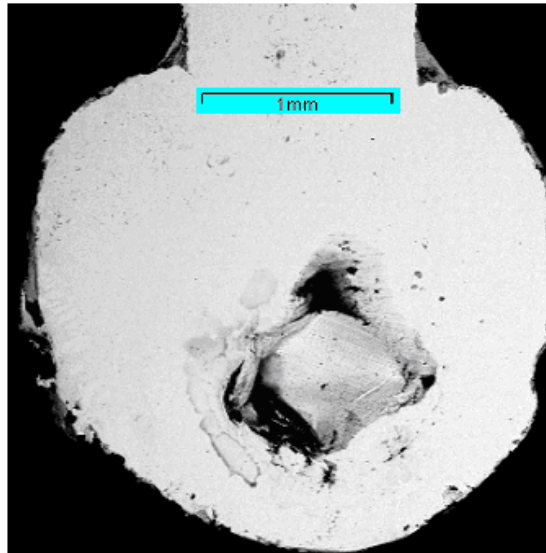


Figure VII.10 : Soudage sous argon + 15% CO₂ $V_f = 15$ m/mn, $I = 410$ A
 [Conditions expérimentales : Fil G002 ; $D_g = 20$ l/mn]

Soudage sous 20% CO₂ $V_f = 11,4$ m/mn, $I = 330$ A

Le transfert se fait par pulvérisation axiale. Le diamètre de la goutte est de 1,9 mm. La forme est moins symétrique que pour les taux de CO₂ plus faibles, et la surface est irrégulière [Cf. Figure VII.11]. On n'observe pas de gangue continue autour de la goutte. Les précipités sont peu nombreux et de petit diamètre (1,5 μ m pour les plus gros), ils concentrent des oxydes de silicium (6% Si) et de manganèse (15% Mn).

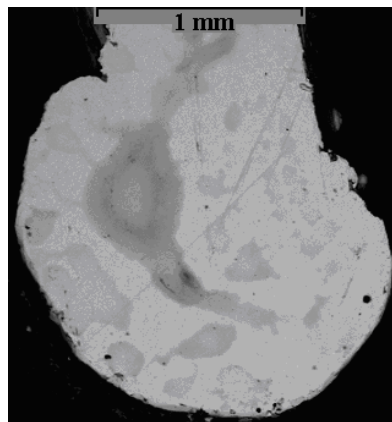


Figure VII.11 : Fil fourré G002, pulvérisation axiale
 [Conditions de soudage : argon + 20% de CO₂, $I = 330$ A, $V_f = 11,4$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

Soudage sous 20% CO₂ V_f = 15 m/mn, I = 410 A

Le transfert se fait par pulvérisation axiale. On n'observe pas de gangue autour de la goutte, mais de petites gouttelettes, sont visibles en périphérie [Cf. Figure VII.12]. Un nodule semble être présent à l'extrémité de la goutte.

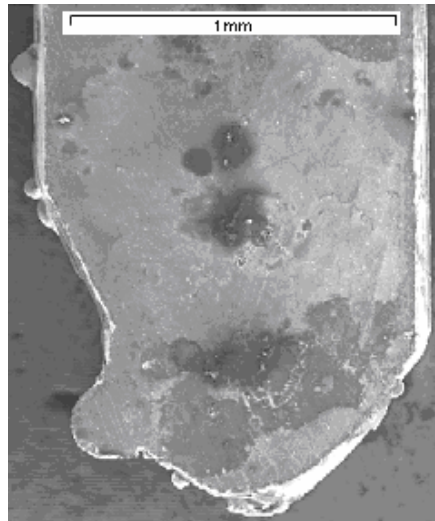
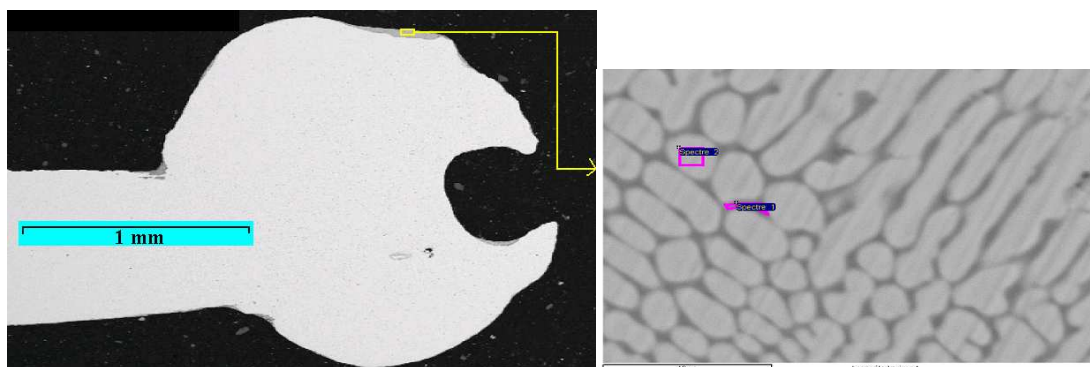


Figure VII.12 : Soudage sous argon + 20% CO₂, V_f = 15 m/mn, I = 410 A
[Conditions de soudage : fil G002, D_g = 20 l/mn]

Soudage sous 40% CO₂ V_f = 11,4 m/mn, I = 330 A

Le transfert se fait en régime globulaire. Le diamètre de la goutte est de 1,7 mm, un trou débouche à l'extrémité de la goutte [Cf. Figure.VII.13_a]. Une gangue d'épaisseur variable (2 à 5 μm sur la majorité des parties de la goutte, jusqu'à 50 μm dans les zones d'accumulation) est composée d'oxyde de fer et de manganèse (28% O, 58% Fe, 10% Mn), avec également une plus forte concentration du silicium (2% Si). L'analyse de la matrice ne fait apparaître que le fer. La gangue présente une structure en deux phases, bien liées [Cf.Figure.VII.13_b]. La phase la plus sombre est plus riche en silicium (7% Si contre moins de 1% Si pour la phase claire). Le silicium se concentre également faiblement dans les précipités (1% Si) qui sont assez nombreuses mais de faible diamètre (1 à 2 μm). Le trou semble s'être formé avant la solidification de la gangue, puisqu'elle est également présente à ce niveau avec la même structure, contrairement à ce qu'on observe lors de l'arrachage d'un précipité.

Sur deux essais analysés, pour l'un le flux non-fondu n'est pas visible, pour l'autre on peut l'observer au milieu de la goutte.



a/ extrémité de l'anode b/structure de la gangue
Figure.VII.13 : Soudage sous fort taux de CO₂, V_f = 11.4 m/mn, I = 330 A
[Conditions de expérimentales : Fil G002 ; D_g = 20 l/mn]

Fil à très faible taux de silicium (G004)

Pour ce fil contenant du silicium sous forme de traces (10 ppm), on observe la concentration des autres éléments (manganèse – fer) constituant des précipités oxydés mais pas de gangue, pour le cas de la pulvérisation axiale (25% de CO₂ – 330 A). Des protubérances présentes à la surface de la goutte sont composées de fer, il s'agit donc probablement de gouttelettes ayant adhéré à la goutte. Pour les essais réalisés la gangue n'a pas été observée, mais des analyses microstructurales complémentaires seraient nécessaires pour conclure quant au comportement de ce fil pour un fort taux de CO₂ (> 40%).

Conclusion

On constate que le comportement du fil fourré est semblable à celui du fil massif, avec une gangue présente dans le cas du régime globulaire, absente dans le cas de la pulvérisation axiale. La fusion du flux en poudre semble se faire de manière homogène avec celle de l'enveloppe (feuillard) donc on peut considérer que la composition de la goutte, au moins au niveau de la zone en contact avec le plasma, correspond bien au mélange des deux parties. La zone où la poudre a fondu et s'est mélangée avec le métal du feuillard n'est réduite (0,3 mm de haut) que dans le cas de l'argon, dans tous les autres cas elle est proche de 1 mm et on peut considérer que les éléments sont correctement mélangés. Les gouttes sont relativement sphériques, même si leur surface est moins régulière.

La réduction du taux de silicium se traduit évidemment par une réduction de la concentration de cet élément dans la gangue. La gangue est observée dès un taux de CO₂ peu élevé (15%), mais uniquement sur une partie de la goutte. Une épaisseur uniforme n'est obtenue que pour le taux le plus élevé (40%). La gangue est composée d'oxydes de fer et de manganèse ce qui, par rapport à la gangue silicatée, modifie à la fois sa conductivité électrique, sa tension de surface et viscosité, d'où une tendance à la formation d'îlots à la surface de la goutte, au lieu d'une couche continue. Comme pour le fil massif la concentration des précipités en silicium reste importante, mais leur nombre et leur taille est plus réduite que pour le fil de référence 70 S.

On peut donc considérer que l'étude sur fils fourrés est dans la continuité de l'étude sur les fils massifs, le procédé étant maintenant optimisé pour ces deux types de fils. C'est une étape importante qui nous ouvre l'accès à des fils de composition choisie.

b/ Fils contenant des éléments susceptibles de former des oxydes conducteurs

Soudage sous argon et faible taux de CO₂

Pour le fil contenant du titane (G003), et un courant de 330 A sous argon, le transfert se fait par pulvérisation axiale. Le fil est en pointe et aucune gangue n'est visible à la surface de la goutte. On observe de très petits précipités (1 à 2 µm de diamètre), contenant des oxydes de silicium, de titane et de manganèse en proportion variable. L'aspect est similaire pour 1,5% de CO₂, on n'observe seulement quelques petits précipités.

Pour le fil contenant du zirconium et du lanthane (G006), pour un courant de 146 A le transfert se fait par court-circuits. On observe une grosse goutte (2 mm de diamètre) creuse, l'espace central vide est dû au retrait lors de la solidification. On n'observe pas de gangue épaisse à la surface de la goutte, mais on relève à la surface une concentration du lanthane et du zirconium. Un gros nodule est visible juste au-dessus de l'accrochage de la goutte, il s'agit peut-être d'une projection ayant collé. Aucun précipité de plus de 1 µm n'est visible. La composition est semblable à celle des précipités observés dans les autres cas, avec un taux de fer plus élevé. Cette différence peut être due à la taille réduite des précipités, ce qui fait que le fer de la matrice est également détecté.

Soudage sous 20% de CO₂

Pour le fil contenant du zirconium (G005), et pour un courant de 240 A, le transfert se fait en régime globulaire. La zone non fondue s'étend jusqu'au haut de la goutte. Une gangue fine (quelques microns) est visible à la périphérie de la goutte dont la forme est assez irrégulière. On n'observe pas de précipité.

Pour un courant de 330 A, le transfert se fait par pulvérisation axiale. La surface de la goutte présente des nodules formant des protubérances en picots, on ne trouve pas de gangue sur la goutte ou à l'accrochage. Un gros précipité (50 µm) est visible au centre de la goutte. Il comporte deux phases et sa structure est friable et fragile. La phase claire est constituée d'oxyde de zirconium (60% Zr + 34% O), la phase sombre est constituée d'oxyde de fer, manganèse et silicium.

On observe également de petits précipités monophasés (3 µm de diamètre) contenant les éléments (O, Si, Mn, Fe) seuls.

Sous un courant de 410 A, pour le fil contenant du titane (G003), le transfert se fait par pulvérisation axiale. Le métal est peu oxydé, on observe quelques précipités contenant des oxydes de titane et de fer. La goutte présente des porosités. A l'extrémité de la goutte on observe un peu de fer oxydé, mais la surface est très irrégulière.

Pour le fil contenant du zirconium et du lanthane (G006) pour le même courant et le même régime de transfert, on n'observe pas de gangue à la surface de la goutte, mais celle-ci présente de nombreuses petites protubérances. Une gangue, peu adhérente, a donc pu s'en détacher. Beaucoup de petits précipités sont visibles, pour les plus gros, on observe un trou au centre. On peut différencier deux phases similaires à celles observées pour le fil G005 à 330 ampères, la seule différence étant que la phase sombre contient en plus du lanthane. L'oxygène représente toujours environ un tiers (en pourcentage massique) de chaque phase. Les précipités sont visibles un peu partout dans la goutte, mais une majorité est située à la périphérie.

Soudage sous 25% de CO₂

Pour le fil contenant du zirconium et du lanthane (G006), à 330 ampères le transfert se fait toujours par pulvérisation axiale. On observe une gangue peu abondante, elle est rassemblée en couche épaisse à l'accrochage de la goutte. Son épaisseur y est de 45 à 75 µm. Elle présente plusieurs phases et de nombreuses fractures, comme si la solidification l'avait brisée. Les deux phases les plus sombres correspondent à celles observées pour 20% de CO₂ à 410 ampères, même si du lanthane (8% La) est également présent dans la phase contenant de l'oxyde de zirconium. Une troisième phase, très claire, est composée d'oxydes de lanthane et de zirconium en quantités similaires (24% O, 26% Zr, 32% La en pourcentage massique).

Sur le côté opposé, une structure polyphasée d'oxydes semble avoir débouché depuis l'intérieur de la goutte.

La composition des petits précipités monophasés est voisine de celles de la phase sombre observée à 20% de CO₂, mais on ne détecte pas le lanthane.

On observe également une porosité au centre de la goutte, pouvant résulter de l'arrachage au cours du polissage du précipité ou d'une bulle de gaz formée lors du refroidissement. Une partie est encore remplie d'oxydes polyphasés.

A 410 A, le régime de transfert est le même et on n'observe pas de gangue à la périphérie de la goutte.

Le fil est peu oxydé, les précipités visibles, de très petite taille, présentent seulement un taux de manganèse un peu plus élevé. La zone non fondue du flux arrive jusqu'au début du haut de la goutte. Il est possible que la goutte observée soit au début de sa formation.

Pour le fil contenant du zirconium (G005) à 410 ampères le transfert est toujours de type

pulvérisation axiale. Une gangue assez épaisse (90 μm) en feuillets est visible sur un côté de la goutte [Cf. Figure VII.14]. Elle ne fait pas le tour de la goutte et ressemble à un précipité qui aurait débouché ou une partie du flux ayant fondu mais ne s'étant pas mélangé avec le métal issu du feuillard.

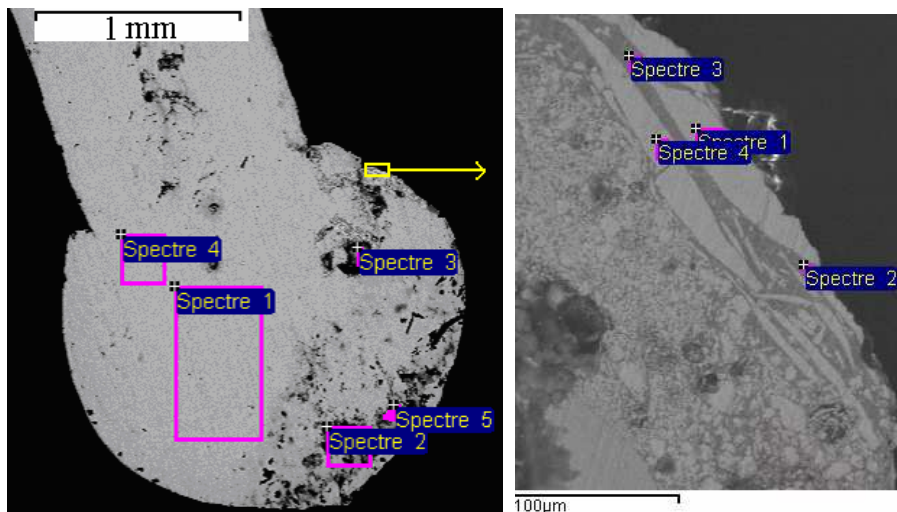


Figure VII.14 : Répartition des phases dans la gangue pour le fil fourré G005 en pulvérisation axiale
[Conditions expérimentales : argon + 25% CO_2 , $I = 410 \text{ A}$, $V_f = 15 \text{ m/mn}$, $D_g = 20 \text{ l/mnl}$]

Les lamelles s'étendent sur une longueur de 100 μm environ pour 30 μm d'épaisseur. Les phases blanches correspondent à de l'oxyde de zirconium (1/3 O + 2/3 Zr en pourcentage massique, ce qui est compatible avec la phase ZrO_2), la zone grise est plus oxydée (40% O) et contient plusieurs éléments (Si, Mn, Fe), le taux de zirconium est relativement faible (4%). La zone non fondue du flux arrive jusqu'au début de la goutte.

Soudage sous 35% CO_2 $V_f = 15 \text{ m/mn}$, $I = 410 \text{ A}$

Pour le fil contenant du zirconium (G005) le transfert se fait par pulvérisation axiale, la zone non fondue atteint le haut de la goutte, un large creux est visible à la suite de l'arrachage d'une partie du flux. Plusieurs gros précipités contenant des oxydes de fer, silicium et manganèse sont visibles. Une gangue de 15 μm est présente sur un côté de la goutte. Plusieurs porosités sont visibles dans la goutte, la plus grosse en occupe le centre (diamètre de 500 μm) et une autre débouche à son extrémité.

Soudage sous 40% CO_2 $V_f = 11,4 \text{ m/mn}$, $I = 330 \text{ A}$

Pour le fil contenant du titane (G003) le transfert est globulaire, une gangue contenant de l'oxyde de titane entoure la goutte et à certains endroits le titane est majoritaire, mais la gangue est constituée essentiellement d'oxyde de fer et de manganèse. Les précipités sont nombreux.

Pour le fil contenant du zirconium et du lanthane (G006) le transfert est également globulaire, la périphérie de la goutte présente des nodules mais pas de gangue étendue, sauf au niveau de l'accrochage de la goutte où elle atteint 140 μm d'épaisseur, sur une petite étendue (0,5 mm). On peut par le contraste au MEB y différencier quatre phases, dont certaines correspondent à celles observées pour les autres fils [Cf. Tableau VII.3] :

- Une phase claire peu abondante et clairsemée,
- Une phase grise représentant environ 40% de la gangue
- Une phase plus sombre représentant environ 40% de la gangue
- Une phase noire, concentrée sous forme de gros précipités (15 à 50 μm)

Les phases sont réparties de façon assez homogène, mais certaines sont incluses dans d'autres [Cf. Figure VII.15].

La phase la plus claire correspond à celle observée à 25% de CO₂ (oxyde de lanthane et de zirconium) et semble s'être solidifiée avant la phase sombre. Dans certains cas elle est incluse dans une autre phase (grise ou noire) dans un ensemble assez sphérique.

La phase grise est plus abondante mais semble également s'être solidifiée avant la phase sombre. Elle est composée d'oxyde de zirconium ZrO₂ (65% Zr et 31% O, % mass ; soit environ 30% Zr et 70% O en pourcentage atomique)

La phase sombre constitue, avec la phase grise, l'essentiel de la gangue. Elle s'apparente à la matrice de la gangue. Dans cette phase sombre l'élément majoritaire, après l'oxygène (31% O) est le lanthane (25% La), puis viennent le fer et le manganèse (15% Mn et 12% Fe), le zirconium étant peu présent (4%). Cette phase est également la plus riche en silicium (10%).

La phase noire constitue la deuxième phase minoritaire, même si elle semble plus abondante que la phase claire. Le fer et l'oxygène y sont les éléments les plus importants (35% O et 23% Fe) mais le manganèse et le lanthane sont également présents de manière significative (14% Mn et 10% La). Nous avons déjà rencontré cette phase dans les fils G006 étudiés pour d'autres conditions de courant et de gaz (gangue et précipités).

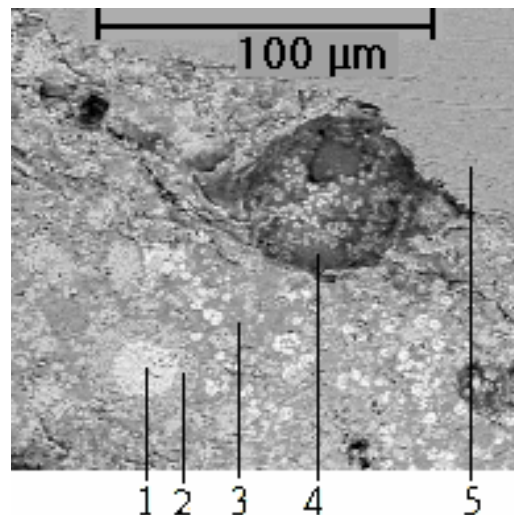


Figure VII.15 : Répartition des différentes phases dans la gangue pour le fil fourré G006 :
1 phase claire ; 2 : phase grise ; 3 : phase sombre ; 4 : phase noire ; 5 : matrice (régime globulaire)
[Conditions expérimentales : argon + 40% CO₂, I = 330 A, V_f = 11,4 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

Fil	Composition		O, Zr, La	Zr, O	O, Fe, Mn, La	O, La, Mn, Fe
G005 20%330 (P)	p			phase claire	Phase sombre	
G006 20%410 (P)	p			phase claire	Phase sombre	
G006 25%330 (P)	g	Phase très claire		Phase claire (+8% La)	Phase sombre	
G006 25%330 (P)	g			Lamelles		
	p				Petits précipités	
G006 40%330 (G)	g	Phase claire		Phase grise	Phase noire	Phase sombre
	p				Phase sombre	

Tableau VII.3 : Comparaison des phases observées pour les fils contenant du Zr (G005) et du Zr + La (G006) (P) : pulvérisation axiale, (G) : régime globulaire. Les phases sont indiquées pour la gangue (g) et les précipités (p).

Dans la goutte, peu de précipités sont visibles. Leur taille est réduite, le plus gros atteint 8 μm mais en général la taille est de l'ordre du micron. La composition est proche de la phase noire, la seule différence étant le plus faible taux de lanthane (2%).

Conclusion sur l'influence du titane, du zirconium et du lanthane

Les éléments étudiés en ajout dans les fils fourrés se concentrent dans les précipités et la gangue sous forme de phases oxydées comme les autres éléments minoritaires des fils. Cependant des différences de comportement apparaissent entre le titane et le zirconium. Le titane se répartit dans la gangue et les précipités de manière assez homogène avec les autres éléments minoritaires, par contre on observe une démixtion en présence de zirconium. Deux phases apparaissent en général, une phase riche et une phase pauvre en zirconium, pour un taux d'oxygène de l'ordre de 30% (à part dans la phase dite claire mise en évidence à 30 % de CO_2). Dans le cas du fil contenant du zirconium et du lanthane (G006), jusqu'à quatre phases peuvent être observées.

Le régime globulaire est associé à la présence d'une gangue épaisse, sauf pour le fil contenant du zirconium où une gangue est observée dans un cas correspondant à la pulvérisation axiale.

Ce résultat est compatible avec une amélioration des propriétés de conductivité électrique de la gangue, puisque le zirconium peut former un oxyde conducteur à haute température. D'autre part, l'apparition de la gangue se produit pour un courant et un taux de CO_2 plus favorable, grâce à l'usage de ces métaux. Des modifications de la conductivité électrique, de la tension de surface et de la viscosité sont certainement mises en œuvre. On peut également évoquer le rôle fondant de l'oxyde TiO_2 ($T_{\text{fusion}} = 573 \text{ K}$, Cf. le diagramme d'Ellingham présenté sur la Figure.IV.18). D'après ce diagramme, la formation des oxydes de zirconium et de lanthane est tout à fait attendue, le comportement à l'oxydation de ces métaux s'apparente à celui du silicium et de l'aluminium.

c/ Fils contenant des fondants

Fils à bas silicium

- Soudage sous argon + 30% de CO_2

Sous 240 A, pour le fil contenant du sodium (G008) le transfert est globulaire. Pour une goutte de 1,5 mm de diamètre on n'observe pas de précipités importants, la gangue n'est pas visible. Le flux n'est pas visible sur la coupe réalisée. Pour 330 ampères, le régime de transfert est le même et on observe des nodules ou des projections ayant adhéré à la surface du fil

Pour le fil contenant un fort taux de lithium (G012) le transfert à 330 A se fait par pulvérisation axiale. La structure est similaire au cas précédent, même si la goutte est plus réduite (environ 1,2 mm de diamètre).

- Soudage sous 35% de CO_2 , I = 330 A

Pour le fil contenant du potassium (G009) le transfert est globulaire. On observe une gangue épaisse de 20 μm à la surface de la goutte. Une première structure monophasée est composée d'oxyde de fer et de manganèse. Une structure diphasée est visible sur un côté de la goutte. La phase sombre, majoritaire, est assez riche en silicium (13% Si) comparé à la phase la plus claire. Des précipités assez petits (5 μm en moyenne, 8 μm pour le plus gros) sont visibles. Ils sont diphasés mais leur faible dimension rend impossible une analyse détaillée. L'analyse globale montre la présence d'oxydes de fer, manganèse et silicium, ainsi que la concentration du potassium (7% K).

- Soudage sous 40% de CO_2 , I = 410 A

Pour le fil contenant du lithium en faible teneur (G007), le transfert est globulaire. Une gangue de 15 à 30 μm est visible autour de la goutte qui a une forme assez irrégulière. On détecte essentiellement le fer et le carbone dans la matrice. Peu de précipités sont visibles mais la zone de fusion du flux semble débiter plus haut dans le fil, juste au-dessus de l'accrochage de la goutte. La gangue est composée d'oxyde de fer et de manganèse (le lithium éventuellement présent n'est pas détectable au MEB).

Pour le fil contenant du potassium (G009) le régime se fait par pulvérisation axiale. Une gangue peu épaisse (5 μm) composée d'oxyde de fer (71% Fe, 24% O en massique, 48% O + 40% Fe en atomique, ce qui est compatible avec la phase FeO) est visible à la surface de la goutte. La zone non fondue semble s'avancer assez loin, mais la goutte semble de faible diamètre. Une partie de la gangue semble avoir été piégée au milieu du métal. Elle apparaît sous forme de lamelles débouchant à la surface, contrairement aux précipités qui sont en général plus petits et symétriques.

- Soudage sous 70% de CO_2 , I = 240 A

Pour le fil contenant du lithium et du potassium (G010) le régime est globulaire. La goutte observée est assez grosse, elle mesure 1,7 mm en hauteur pour 1,5 mm de largeur. On observe quelques précipités de gros diamètre. Vers l'extrémité de la goutte, une fine gangue (10 μm) est présente. On n'observe pas de fusion complète au-delà de la goutte mais la microstructure n'est pas tout à fait celle du fil non affecté thermiquement (zone transitoire au niveau de l'attache de la goutte).

Conclusion sur les fils à faible taux de silicium contenant des alcalins

Comme les autres fils fourrés, une gangue et des précipités sont visibles dans les cas correspondant au régime globulaire (sauf pour le premier cas, où la gangue a pu s'arracher). Des projections ou gouttelettes ayant adhéré à la surface, plutôt que des nodules, sont fréquemment observés. On constate que le flux est fondu jusqu'à une hauteur de quelques millimètres au-dessus du sommet (accrochage) de la goutte, ce qui découle de l'effet fondant des alcalins ajoutés dans ces fils fourrés.

De bons résultats sont obtenus en termes de persistance du régime de pulvérisation axiale sous fort taux de CO_2 .

Fil à taux de silicium élevé (G11, Mégafil)

Les essais pour cette configuration ont surtout été réalisés avec le fil contenant les trois alcalins (Mégafil). Quand ce n'est pas précisé, c'est ce fil qui est étudié.

- Soudage sous argon

On observe à 146 ampères (régime de transfert par court-circuit) un gros précipité (diamètre de 350 μm environ) visible au-dessus de l'accrochage de la goutte. Une gangue est présente au bas de la goutte, elle est constituée de fer modérément oxydé (environ 10% O), le silicium est un peu plus important que dans la matrice. Un nodule est présent sur le côté de la goutte, il est principalement constitué de silice (64% O, 18% Si). Quelques précipités sont visibles, leur faible taille (de l'ordre de 1 μm) rend leur analyse difficile.

Pour un courant de 240 ampères (transfert globulaire), on observe une goutte de taille moyenne, de diamètre 1,4 mm. On observe une fine gangue (11 μm) entourant la goutte, composée principalement d'oxyde de fer. Quelques précipités assez grands (40 μm) sont visibles, ils concentrent l'oxygène, le silicium et les alcalins K, Na (le lithium ne pouvant être détecté). Dans le fil on observe de grosses porosités (diamètre de 450 μm) correspondant probablement à l'arrachage de précipités lors du polissage dans la zone où le flux est fondu dans le fil. On note la présence d'un peu de Cr et de Ca.

- Soudage sous 15% de CO_2

Pour un courant de 240 ampères le régime est globulaire, on observe une gangue peu adhérente d'une épaisseur moyenne de 17,5 μm entourant la goutte. Plusieurs précipités circulaires sont visibles sur la partie droite de la coupe. Ils mesurent entre 10 et 15 μm de diamètre, mais on observe également un gros précipité de 60 μm de diamètre. Il est situé à 0,53 mm de la périphérie de la goutte. Une partie de ce précipité a été arrachée. Ces zones sont enrichies en silicium (pic important en EDS), oxygène et manganèse. L'analyse du feuillard n'ayant pas fondu, entourant le flux, ne fait par contre apparaître que du fer, du manganèse et du carbone. Le flux est fondu jusqu'à une limite située au-dessus de la goutte, on y observe

encore de larges précipités. Leur composition est voisine de celle des précipités présents dans la goutte. Le taux de silicium dans les différentes structures est plus important que pour les autres fils, le taux initial étant plus important (0,79% Si contre 0,35% pour les deux autres fils qui présentent la concentration en Si la plus forte, 70 S ou G011).

Sous 410 ampères, le transfert se fait par pulvérisation axiale. On observe un trou au milieu de la goutte (100 μm de diamètre) dû au retrait lors de la solidification. Des précipités sont visibles, les plus gros atteignent 60 μm et sont composés d'oxydes de manganèse et silicium. Le fer est minoritaire (4%). On n'observe pas de gangue à la périphérie de la goutte.

- Soudage sous 25% de CO_2

Pour un courant de 330 ampères, le transfert se fait par pulvérisation axiale et on n'observe pas de gangue. Un trou est visible au sommet de la goutte (à l'accrochage) d'un diamètre de 400 μm , il correspond probablement à une porosité formée lors de la solidification. On observe un gros précipité central (d'un diamètre de 100 μm) avec une phase sombre riche en oxygène, manganèse et silicium ainsi qu'en potassium. L'autre moitié du précipité est occupée par une phase claire, peu oxydée, contenant majoritairement du fer. On observe de nombreux autres précipités d'un diamètre ne dépassant pas 10 μm .

Pour un courant de 410 ampères (même régime de transfert), on observe un très gros précipité de 300 μm de large pour 450 μm de long situé à 0,45 mm au-dessus de l'accrochage de la goutte ; le flux est fondu jusqu'à 3 mm au-dessus du haut de la goutte [Cf. Figure VII.16]. Au niveau de l'accrochage de la goutte on observe une accumulation d'oxydes en surface, d'une épaisseur d'environ 20 μm . Cette zone est enrichie en Si et contient un peu de Ca. On n'observe pas de gangue sur le reste du fil. Dans les précipités on observe un fort enrichissement en K. Ils sont répartis dans tout le volume de la goutte. Quelques-uns sont visibles à la périphérie de la goutte, mais les plus gros (40 μm et plus) sont plutôt au centre. Ils présentent en général un arrachage partiel dû à la manipulation et à l'usinage du fil. Dans la zone correspondant au flux ayant fondu, on observe un large précipité de forme irrégulière contenant des dendrites de contraste plus clair que le reste du précipité. Ces dendrites sont riches en silicium et contiennent un peu de fer, manganèse et des traces de chrome. La phase plus sombre est encore plus riche en Si et concentre également le potassium et le calcium.

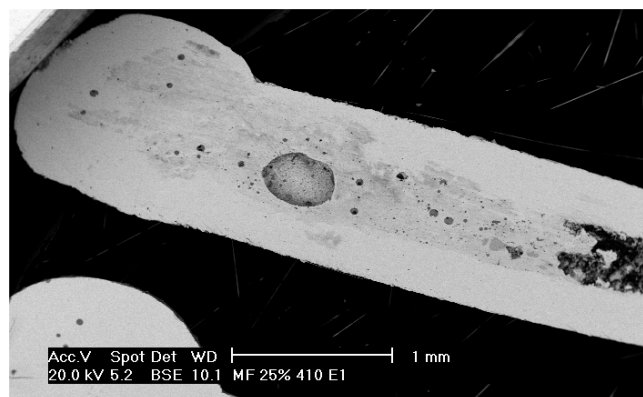


Figure VII.16 : Extension de la fusion du flux dans le fil Mégafil
[Conditions expérimentales : argon + 25% CO_2 , $I = 410$ A, $V_f = 15$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

- Soudage sous 30% de CO_2

Pour un courant de 410 ampères le transfert se fait par pulvérisation axiale, on observe un gros pore circulaire (250 μm de diamètre) au niveau de l'accrochage de la goutte. Il est partiellement rempli d'oxydes et résulte de l'arrachage d'une partie du précipité. La zone de fusion du fil arrive environ 1 mm au-dessus de la goutte. Plusieurs précipités plus petits (15 à 50 μm) sont visibles et contiennent des oxydes de silicium et de manganèse, avec également du potassium. On n'observe pas de gangue à la surface de la goutte.

- Soudage sous 40% de CO_2

Sous un courant de 410 ampères les observations sont très similaires au cas précédent, avec un précipité de fort diamètre (136 μm) et une fusion du flux jusqu'à 1 mm au-dessus de l'accrochage de la goutte. On n'observe pas de gangue à la surface de la goutte et les précipités sont plutôt rassemblés vers le sommet de la goutte.

Pour le fil contenant du lithium et du potassium (G011), on observe pour un courant de 330 ampères (transfert par pulvérisation axiale) une goutte de diamètre assez réduit : 0,94 mm en hauteur pour 1,25 mm en largeur. La structure du fil, au centre, est compacte. On ne retrouve la structure granulaire (donc non fondue) du flux que 1 mm environ au-dessus de la limite supérieure de la goutte. On observe peu de précipités, mais une large porosité est visible en bas à droite de la goutte. Elle mesure environ 200 μm de large sur 100 μm de haut, la plus grande dimension étant dans le sens de la largeur de la goutte.

A l'extrémité de la goutte, on observe en surface des nodules formant des protubérances comme celles observées avec les autres fils (G002, AS 26...) mais aucune gangue n'est visible.

- Soudage sous 50% de CO_2

Pour un courant de 330 ampères le mode de transfert est proche de la transition entre la pulvérisation axiale et le régime globulaire. On observe un gros pore circulaire (350 μm de diamètre) au niveau de l'accrochage de la goutte. Il est partiellement rempli d'oxydes et résulte de l'arrachage d'une partie du précipité. La zone de fusion du fil arrive environ 1 mm au-dessus de la goutte. Plusieurs précipités plus petits (15 à 50 μm) sont visibles et contiennent des oxydes de silicium et de manganèse, avec également du potassium. On n'observe pas de gangue à la surface de la goutte, sauf au niveau de l'accrochage de la goutte et dans un creux à l'extrémité, pouvant résulter de l'expulsion d'un précipité. Ceux-ci sont très majoritairement concentrés vers le haut de la goutte.

- Soudage sous 60% de CO_2

Pour un courant de 330 ampères le transfert est globulaire et on observe une gangue peu épaisse (14 à 26 μm) à la périphérie de la goutte. Elle est constituée de fer modérément oxydé (environ 10% O), le silicium n'est pas plus important que dans la matrice. La goutte ne présente pas de gros précipités au niveau de l'accrochage, ce qui peut être dû à la cinétique de détachement. Quelques précipités sont visibles, leur faible taille (de l'ordre de 1 μm) rend difficile une mesure de leur composition.

Pour un courant de 410 ampères, le régime est globulaire mais encore proche de la transition. On observe un gros pore circulaire (350 μm de diamètre) au niveau de l'accrochage de la goutte. Il est partiellement rempli d'oxydes et résulte de l'arrachage d'une partie du précipité. La zone de fusion du fil arrive environ 1 mm au-dessus de la goutte. Plusieurs précipités plus petits (15 à 50 μm) sont visibles et contiennent des oxydes de silicium et de manganèse, avec également du potassium. Une fine gangue (10 μm) recouvre une partie de la goutte. Les précipités sont rassemblés vers le haut et le centre de la goutte, mais deux d'entre eux sont visibles vers la périphérie, le diamètre de l'un atteint 50 μm .

- Soudage sous 70% de CO_2

Pour un courant de 330 ampères, le transfert est globulaire et on observe deux gros précipités (120 μm de diamètre) un peu au-dessus de l'accrochage de la goutte. Un pore de 170 μm de diamètre semble résulter du retrait lors de la solidification. Un précipité de 30 μm est visible au milieu de la goutte, mais aucun n'est présent en périphérie. Le potassium se concentre dans les précipités. La goutte est recouverte d'une gangue de quelques microns d'épaisseur contenant des oxydes de fer, silicium et manganèse.

Pour un courant de 410 ampères (transfert globulaire) aucun précipité n'est visible. La gangue entourant la goutte présente une seule phase, son épaisseur est de quelques microns. Le nodule présent à l'extrémité de la goutte contient de l'oxyde de silicium et de fer ainsi que du potassium.

Bilan de l'étude des fils contenant des alcalins

Les fils contenant des alcalins sont ceux présentant les meilleures performances en terme de limite de transition. Au niveau de la microstructure, on constate que si la présence ou l'absence de gangue est toujours corrélée au régime de transfert, la formation des précipités ici est nettement différente. Dans la majorité des cas, en effet, on trouve un très gros précipité (plus de 150 μm de diamètre) au centre ou juste au-dessus du sommet de la goutte, phénomène que nous n'avons pu observer que dans les fils fourrés comportant des fondants alcalins.

Des précipités plus petits sont également présents un peu partout dans la goutte, contrairement aux autres fils où les précipités étaient plutôt concentrés à la périphérie. On peut supposer que l'absence de gangue pour des taux de CO_2 relativement élevés (plus de 30%) peut s'expliquer par une remontée des oxydes dans la goutte, le métal fondu étant plus fluide sous l'action des fondants, modifiant ainsi les propriétés de tension de surface, de mouillage et de viscosité du liquide formé, mais aussi par capillarité, le fil fourré étant de nature poreuse.

iii. Commentaire concernant les compositions chimiques

L'analyse EDX fournit une information, plus ou moins précise selon les éléments, sur les quantités présentes dans l'échantillon observé. Elle ne donne pas d'information sur la composition chimique des phases présentes mais seulement les pourcentages des différents éléments détectables, par exemple 50% de fer et 50% d'oxygène (%at). Il est donc impossible de savoir si dans la structure on trouve uniquement FeO , ou bien un mélange $\text{Fe-Fe}_2\text{O}_3$, par exemple. Or la connaissance des différentes phases formées est importante, car certains éléments M peuvent former plusieurs phases de type M_xO_y de propriétés différentes, notamment en terme de conductivité électrique. Il est donc important de prévoir, compte tenu de la température et des proportions des différents éléments, quels oxydes sont susceptibles de se former.

Les diagrammes d'Ellingham apportent des informations sur la stabilité des différentes phases oxydées dans les conditions d'équilibre thermodynamique [Cf. Chapitre IV.5].

2.2. Conclusion générale de l'étude de la microstructure des fils

L'étude comparative d'un fil fourré (G002) et d'un fil massif (AS 26) de composition voisine montre que les comportements en soudage et les caractéristiques microstructurales observés sont similaires pour les deux types de fils. Ainsi, ces expériences valident l'utilisation du fil fourré en substitution du fil massif, aussi bien en terme de régimes de soudages, qu'en terme de phénomènes physico-chimiques, notamment d'interaction liquide - atmosphère de travail.

Pour tous les fils étudiés (fils fourrés et fils massifs), l'évolution des comportements est comparable à celle observée pour le fil de référence 70 S : une gangue d'oxydes est présente dans le cas du régime globulaire, son épaisseur croît avec le taux de CO_2 et décroît avec le courant. Les oxydes précipitent également sous forme de précipités répartis dans la matrice. Il y a donc une relation directe entre la formation de ces oxydes et la présence de CO_2 dans le gaz de protection, conformément aux prévisions thermodynamiques (Cf. diagrammes d'Ellingham, chapitre IV.5). Des réactions d'oxydoréduction ont lieu entre le CO_2 , qui joue le rôle d'oxydant, et les métaux. Les phases SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 par exemple ont pu être mises en évidence dans les précipités et la gangue, en accord avec les prévisions thermodynamiques.

La modification de la composition du fil par retrait d'un élément (le silicium par exemple) ou ajout de métaux choisis (Ti, Zr, La pour les propriétés conductrices de leurs oxydes, et K, Li, Na pour leur propriétés de fondants) modifie considérablement les propriétés physico-chimiques du système telles que les points de fusion, les tensions de surfaces, la nature des phases en équilibre.

Pour les fils fourrés étudiés, la fusion du flux et du feuillard est homogène, les éléments se mélangeant au niveau de la goutte terminant l'électrode. Lorsque des fondants sont ajoutés, la hauteur de la zone fondue est encore plus haute.

La surface des gouttes pour les fils fourrés est généralement plus irrégulière que pour les fils massifs, du fait de la structure initiale moins dense (présence de poudre) du matériau. La gangue est souvent peu adhérente, elle se détache parfois, probablement lors du refroidissement de la goutte, du fait des différences de coefficients de dilatation thermique.

L'abaissement du taux de silicium dans le fil permet d'améliorer les performances du soudage en présence de CO₂, la gangue formée étant appauvrie en silice par rapport au fil standard, et étant plus discontinue (formation de nodules). Que ce soit pour les fils massifs ou les fils fourrés, on constate que les éléments métalliques supplémentaires par rapport au fil de référence sont effectivement présents dans la gangue ou les précipités. En présence d'ajouts de titane, zirconium ou lanthane dans les fils fourrés, le régime de pulvérisation axiale a pu être maintenu à un taux de CO₂ supérieur à celui du fil standard (35% CO₂ à 410 A par exemple en présence de zirconium), vérifiant l'amélioration du en présence de phases d'oxydes moins isolantes que la silice. Le résultat le plus significatif est obtenu avec le zirconium où nous avons pu constater un régime de pulvérisation axiale alors qu'une gangue s'était constituée ! En présence d'alcalins, la formation de la gangue est retardée jusqu'à 50% de CO₂ à 330 A. Dans les fils testés, on a pu constater la présence d'un précipité de grande taille formé d'oxydes, localisé dans le fil, au-dessus de la goutte. Par rapport aux autres fils étudiés, tout se passe comme si la gangue était maintenue à l'intérieur du fil, n'opposant pas de contrainte d'accrochage au plasma. L'analyse de l'influence des différents composés présents dans la gangue fait l'objet du chapitre suivant.

3. ETUDE DE LA GANGUE

3.1. Introduction

L'extrémité de l'électrode de soudage constitue la liaison entre le fil (anode) et le plasma. Il a été montré dans le chapitre VI que sa forme diffère considérablement selon le régime de soudage, globulaire ou par pulvérisation axiale. Dans les deux cas l'extrémité du fil est liquide et le métal est transféré sous forme de gouttes, mais leur formation présente de nombreuses différences. Dans le cas de la pulvérisation axiale l'extrémité de l'électrode forme une veine de métal liquide étroite de laquelle les gouttes, de faible diamètre, se détachent. Pour le régime globulaire les gouttes ont un diamètre supérieur à celui du fil et grossissent directement depuis la partie solide. Outre la taille, la cinétique de formation et de croissance des gouttes est plus lente dans le deuxième cas, (jusqu'à quelques dizaines de millisecondes) contre moins de 2 ms en pulvérisation axiale. Ces différences peuvent se traduire par une modification de la composition de la goutte, ce qu'a confirmé l'analyse microstructurale présentée ci-dessus. Le principal résultat est la présence d'une gangue à la surface des gouttes dans les cas associés au régime globulaire. L'objet de ce paragraphe est de présenter les caractéristiques et les propriétés de cette gangue et d'en déduire son influence sur le fonctionnement de l'arc. Dans la perspective d'obtenir un soudage en pulvérisation axiale pour le plus fort taux de CO₂ possible, la compréhension du rôle de la gangue apparaît comme tout à fait indispensable.

3.2. Observation de la gangue

L'observation de la goutte formant l'extrémité de l'électrode, pendant le processus de soudage, n'est pas aisée du fait de sa faible durée de vie et sa petite taille (diamètre inférieure à 2 mm). Le protocole généralement employé consiste donc à son prélèvement après extinction de l'arc, ce qui permet d'utiliser des moyens d'analyse poussés comme le microscope électronique à balayage couplé à l'analyse EDX pour appréhender sa nature physico-chimique. Nous avons largement développé cette approche dans les paragraphes précédents. Cette méthode présente cependant l'inconvénient d'introduire une incertitude liée à la cinétique de solidification de la goutte. Même s'il semble probable que la gangue existe in situ lors du processus de soudage, il est difficile de connaître son état (solide ou liquide) à partir des seules caractérisations de la goutte solidifiée. Comme le phénomène de conduction du courant est très différent en phase solide et liquide, la connaissance de l'état physique de la gangue est indispensable. Sa conductivité électrique

est en effet déterminante par rapport aux phénomènes étudiés, en relation avec la forme des lignes de courant dans le plasma et le métal.

L'existence d'une gangue d'oxyde a été mise en évidence, dans un tout autre contexte, lors d'études spécifiques des propriétés des métaux, notamment dans la thèse de G. Wille [147]. Dans ces travaux, une goutte de quelques millimètres de diamètre est placée en lévitation aérodynamique et chauffée par un rayonnement laser de puissance (800 W), dans une atmosphère contrôlée (argon, CO₂...). Cependant ce dispositif était spécifiquement destiné à la formation des oxydes, pour l'étude de leurs propriétés fondamentales. Avant les travaux de S. Zielinska [1] il n'avait jamais été fait mention de la présence d'une gangue d'oxyde sur les gouttes terminant les électrodes en soudage MIG-MAG.

Pour valider la présence de la gangue in situ et déterminer son état lors du soudage, des observations spécifiques ont été réalisées : tout d'abord après solidification, d'après la caractérisation microstructurale, par ailleurs par observation in situ à l'aide de la caméra. Les analyses apportent de nombreux arguments en faveur de l'hypothèse d'une gangue liquide, présente lors du procédé de soudage.

Les températures attendues à l'interface goutte-plasma sont élevées : les valeurs calculées par J. Hu. et H.L. Tsai [39] sont de 2600 K (à la surface en bas de la goutte) à 2900 K (sur les côtés de la goutte). Cela implique donc un état fondu, peut-être même la vaporisation de certains composants compte-tenu des propriétés thermodynamiques [Cf. Figure.IV.18 : Diagramme d'Ellingham].

On observe que la gangue suit fidèlement le contour de la partie métallique de la goutte, même lorsqu'il est très accidenté [Cf. Figure VII.17]. Elle présente un aspect amorphe compatible avec la trempe d'un liquide de composition vitrifiable.

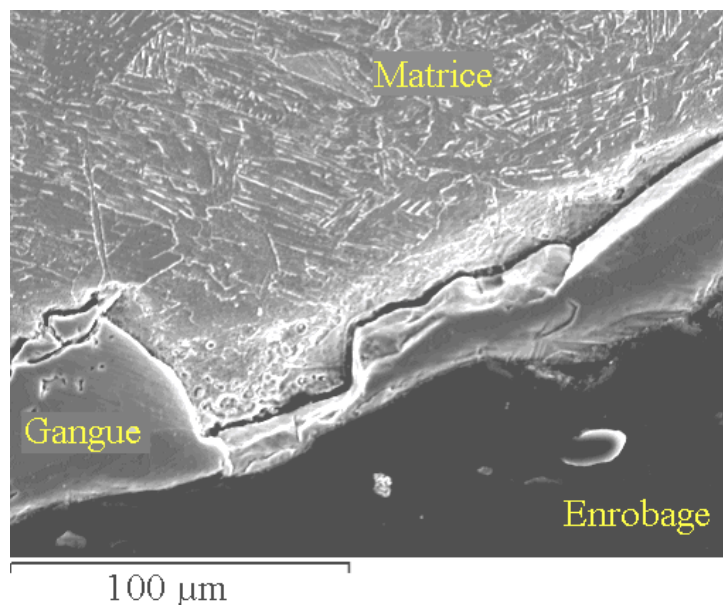


Figure VII.17 : Fil AS 35, argon seul – $I = 146$ A
[Conditions expérimentales : Fil AS 35 ; $V_{fil} = 3,5$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

Sur la Figure VII.18, on peut voir une gouttelette de métal solidifiée au moment de son détachement de la goutte principale, dont la surface externe est visible sur le bas de l'image. On constate que la gouttelette a traversé la gangue en perçant celle-ci. On peut donc en déduire que la gangue était présente lorsque la goutte était liquide, donc au cours du soudage. Le fait que la gangue couvre par mouillage le contour d'une partie de la gouttelette semble confirmer qu'elle était également liquide.

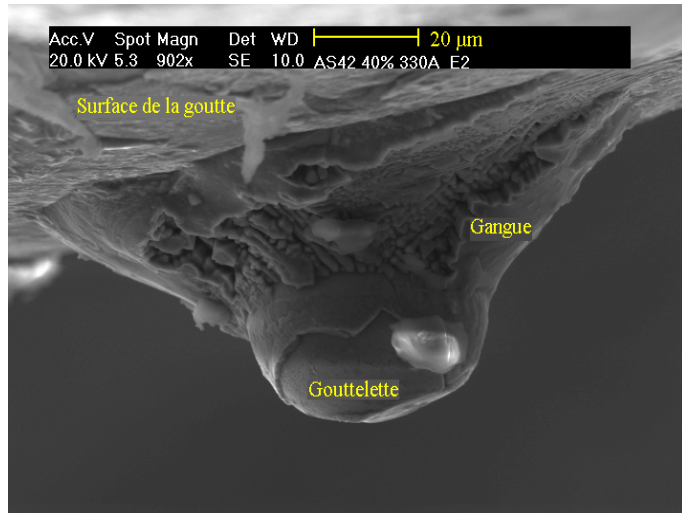


Figure VII.18 : Gouttelette de métal à la surface de la goutte, piégée dans la gangue
 [Conditions expérimentales : Fil massif AS 42 ; argon + 40% CO₂ | = 330 A ; V_{fil} = 9 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

L'emploi de la caméra Fastcam 1024 PCI a permis de réaliser une visualisation directe. La résolution spatiale (10 μm par pixel) est suffisante pour obtenir des détails précis, la vitesse d'acquisition de 3000 images par secondes permettant de suivre l'évolution de la goutte.

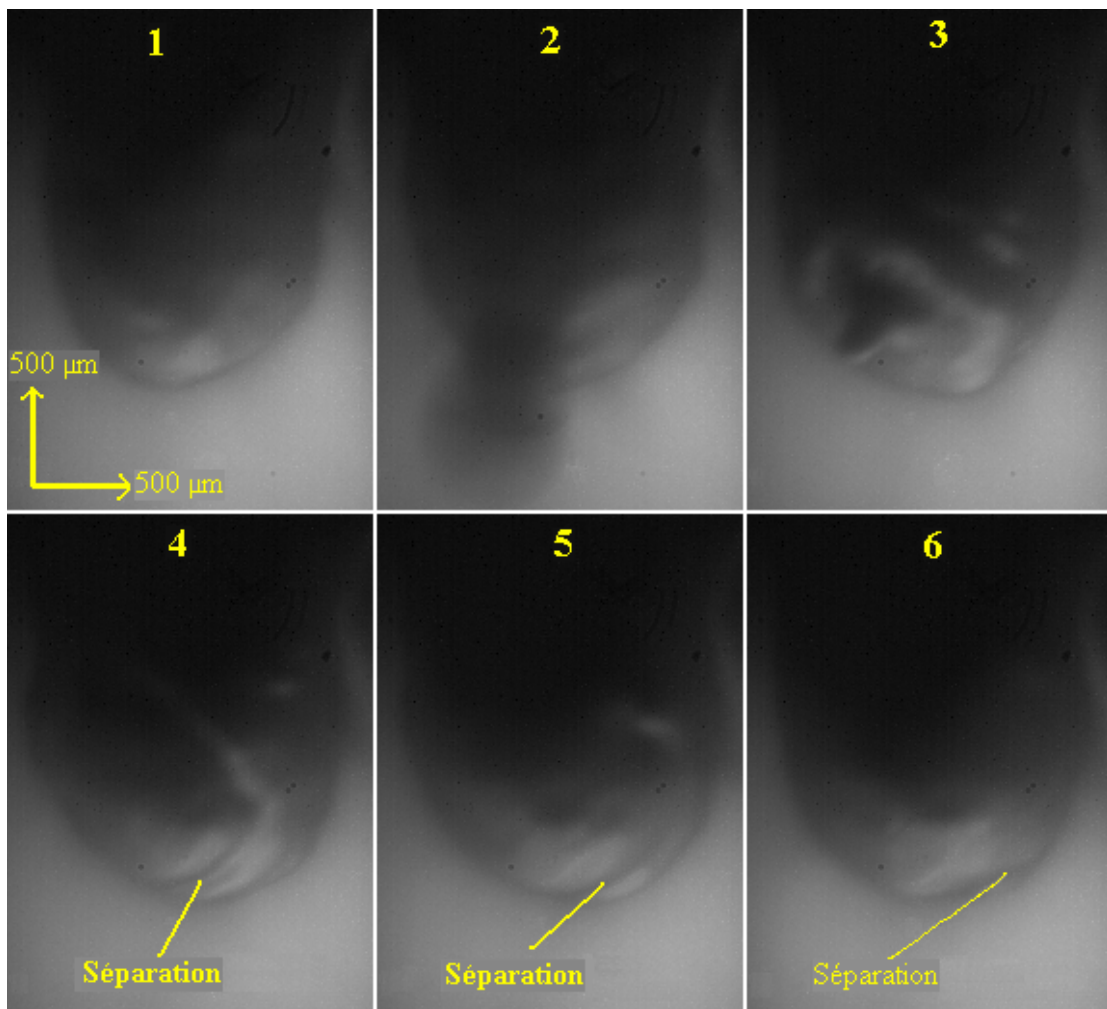


Figure VII.19 : Visualisation de la gangue, $\delta t = 333 \mu s$.
 [Conditions expérimentales : Fil AS 26 ; argon + 30% CO₂ ; | = 330 A ; V_{fil} = 9 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

La séquence d'images présentée sur la Figure VII.19 correspond au soudage avec le fil AS 26 (0,064% Si). Pour obtenir un régime globulaire stable le taux de CO₂ employé est de 30% pour un courant de 300 ampères. Les six images successives présentées sont séparées chacune de 333 μs (fréquence d'acquisition de 3000 images par secondes).

On peut voir un morceau de la gangue se détacher (image 2), ce qui produit une onde de choc (image 3) causant le retrait momentané de la gangue (images 4 et 5) : la gangue ne recouvre la goutte qu'à droite (partie claire). Elle se reforme ensuite, puisqu'on ne distingue presque plus de contraste à la surface de la goutte sur l'image 6. En effet la gangue se forme en permanence au contact du métal liquide.

L'étude des enregistrements vidéo permet d'estimer l'épaisseur de la gangue à 20 à 30 μm, ce qui est du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la gangue mesurée au microscope sur les coupes solidifiées.

L'observation dans les différents cas montre, pour tous les fils, que la gangue est présente sous forme liquide au cours du fonctionnement de l'arc. L'observation détaillée de la surface des gouttes en régime globulaire montre que cette gangue ne forme pas une couche statique. Elle connaît au contraire de nombreuses déformations dont les plus extrêmes sont celles présentées sur la séquence précédente. La gangue présente souvent plusieurs couches, comme on peut le voir sur la Figure VII.20 :

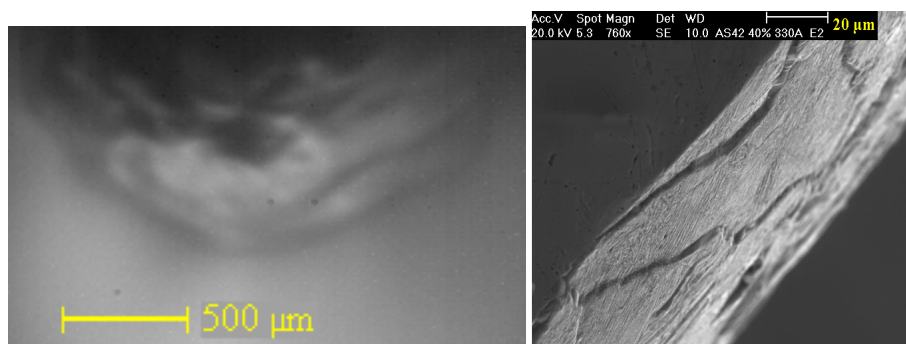


Figure VII.20 : Structure de la gangue en régime globulaire, fil massif AS 42 :
 (a) : en cours de fonctionnement ; (b) : après extinction de l'arc
 [Conditions expérimentales : Fil AS 42 ; argon + 50% CO₂, I = 330 A ; V_{fil} = 9 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

Pour les fils fourrés le régime globulaire est similaire à celui observé pour les fils massifs, avec cependant une plus grande instabilité de la forme de la goutte. L'observation montre que la gangue est également présente, comme on peut le voir sur la Figure VII.21. Elle est encore plus instable que pour les fils massifs et des morceaux s'en détachent fréquemment pendant la croissance de la goutte. C'est ce qui explique que pour les fils fourrés il soit plus difficile d'observer une gangue d'épaisseur constante, régulièrement répartie autour de la goutte.

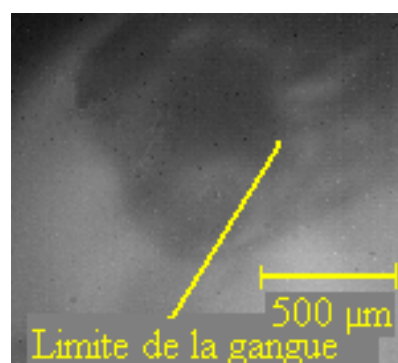


Figure VII.21 : Visualisation de la gangue en fil fourré
 [Conditions expérimentales : Fil fourré G006 ; argon + 20% CO₂, I = 240 A ; V_{fil} = 7,3 m/mn ; D_g = 20 l/mn]

3.3. Formation de la gangue

La gangue se forme à la surface du fil fondu à la suite d'une réaction d'oxydation entre le matériau constituant l'électrode et l'oxygène présent dans le gaz de protection. Dans le cas du soudage avec du CO₂, l'oxygène provient de la dissociation de cette molécule. D'après les diagrammes d'Ellingham, [Cf section IV.5.3, page 81] compte-tenu des températures attendues, cette dissociation passe par la formation de CO. Plus la pression partielle en CO₂ est élevée et plus la gangue peut être abondante.

Dans le cas du soudage sous argon seul, le régime globulaire peut être observé pour de faibles courants (en-dessous de 240 ampères) et dans le cas du régime de court-circuit (courant de 146 ampères) une gangue épaisse (50 µm) est visible. Cette gangue est cependant moins oxydée que lorsque du CO₂ est présent. On peut supposer que l'oxygène provient principalement des fuites d'air existant au niveau du tube – contact. Par ailleurs l'argon utilisé n'est pas totalement pur et des traces d'oxygène peuvent subsister, de même que dans le fil. Un courant modéré (supérieur à 250 ampères) suffit à pulvériser cette gangue. Celle qui se forme en soudage avec du CO₂ subsiste même pour les courants les plus élevés disponibles, au-delà d'un certain taux (plus de 17% pour le fil de référence 70 S).

Il a été montré dans le chapitre précédent que la gangue contenait, outre l'oxyde de fer, des oxydes des différents éléments minoritaires qui se concentrent à ce niveau. Il existe donc une ségrégation dans la goutte fondue qui enrichit la zone périphérique en éléments autres que le fer (silicium, manganèse ou tout autre élément apporté). L'oxydation de la surface conduit à former les différents oxydes, constituant un liquide non miscible dont la densité est différente de celle du fer fondu. C'est ce qui explique pourquoi la gangue semble « flotter » à la surface de la goutte et forme une zone bien distincte. Ceci rappelle la formation du laitier en métallurgie, concentrant les impuretés dans les phases oxydées, et flottant sur la fonte liquide. La densité des oxydes est en effet plus faible que celle du fer fondu (d'un rapport 2 environ [147,149]). Une fois refroidie, les oxydes étant plus cassants que le métal, la gangue assez fine est particulièrement fragile. Si de plus elle est peu adhérente, par le développement de fractures à l'interface entre les deux milieux dues aux différences de coefficient de dilatation thermique, elle peut se détacher facilement lors des manipulations de l'extrémité de l'électrode ou même lors du refroidissement.

La présence de la gangue sous argon pourrait donner à penser qu'il s'agit d'une conséquence de la taille plus importante des gouttes, autorisant la migration des éléments à partir d'un plus grand volume de métal fondu. Cependant, on constate qu'en régime globulaire, pour deux essais sous un taux de CO₂ différent, des gouttes de diamètres similaires peuvent être obtenues. Il se trouve que la gangue est plus épaisse dans le cas correspondant au taux de CO₂ le plus élevé. La formation de la gangue est donc bien une conséquence de l'ajout de CO₂, et sa disparition provient d'une augmentation du courant et donc de température, comme le prévoit le diagramme d'Ellingham. Le régime globulaire est donc lui-même une conséquence de la formation d'une gangue épaisse

3.4. Composition chimique

Les analyses chimiques réalisées sur le fil de référence 70 S montrent que les principaux constituants de la gangue sont le fer et l'oxygène (30 à 50% en pourcentage atomique, pour chacun de ces éléments, lorsque du CO₂ est ajouté au gaz de protection). Le silicium et le manganèse constituent les deux autres éléments majeurs. Ils se concentrent en quantité importante par rapport au taux initial (respectivement 1,07% et 0,69% en pourcentage atomique) d'autant plus que le taux de CO₂ est important : de 5% (% at.) pour un taux de 15% de CO₂ dans l'argon à plus de 10% (% at.) pour un taux de 40%. Les différents fils étudiés se classent en deux catégories, ceux pour lequel le taux de silicium a été réduit (AS 26 et AS 35 pour les fils massifs, G002 et G003 pour les fils fourrés) et ceux pour lesquels un ou plusieurs éléments ont été ajoutés. Le but de la modification de la composition initiale du fil est de changer la composition finale de la gangue. Pour le premier

groupe de fil, la réduction du taux de silicium visait à former une gangue moins isolante et moins réfractaire, sachant que la silice présente ces deux caractéristiques.

Ces éléments d'ajout se classent eux même en deux catégories, ceux susceptibles de former des oxydes conducteurs et les alcalins. L'influence d'un oxyde conducteur est évidente, si on cherche à supprimer l'effet pénalisant de la gangue sur le flux de courant. Le rôle des alcalins peut être double : d'une part un effet sur le plasma, sachant que ces éléments sont en général facilement ionisables, d'autre part un effet sur les propriétés mécaniques du métal liquide. La première propriété a déjà été étudiée [30, 31], notamment dans le cas du soudage en polarité directe (fil-cathode). L'objectif était alors de réduire le travail de sortie des électrons (émis par le fil-cathode) par un revêtement fin d'alcalins. En facilitant le passage du courant à travers l'extrémité de l'électrode il est possible de modifier les caractéristiques des forces électromagnétiques agissant sur la goutte pour en faciliter le détachement. Cette approche est semblable à celle utilisée avec la formation d'oxydes conducteurs. Par contre, l'influence des alcalins sur le plan métallurgique n'a jamais été étudiée dans le cas de la soudure. Ces éléments sont d'autre part largement utilisés dans le but d'abaisser le point de fusion dans l'industrie des céramiques et des verres, on les désigne d'ailleurs sous le terme de fondants.

3.5. Influence des caractéristiques électriques

Si on considère que la présence de la gangue constitue un obstacle au passage du courant du fait de sa conductivité électrique faible, la modification de ce paramètre permettrait d'en supprimer l'effet. Si le courant électrique peut passer dans les mêmes conditions qu'en l'absence de gangue, la forme des lignes de courant dans la goutte et dans le plasma n'est pas modifiée par la présence de la gangue. Les forces électromagnétiques résultantes sont donc inchangées et le régime de pulvérisation axiale peut être conservé. Dans de telles conditions la gangue pourrait toujours être présente en régime de pulvérisation axiale sous fort taux de CO₂.

Dans un oxyde liquide, la conductivité électrique est de type ionique. Le transport du courant est assuré par les ions et est toujours plus réduit que dans un métal. Pour décrire le passage du courant de l'électrode vers l'arc, il faut donc considérer trois phénomènes :

- Un passage de courant dans un métal assuré par les électrons
- Un passage de courant dans la gangue assuré par les ions
- Des réactions d'oxydoréduction à l'interface entre le métal et la gangue d'une part, et le plasma et la gangue d'autre part.

L'oxyde de silicium est très isolant, il est donc prévisible que moins cet élément est présent dans le fil et plus l'effet négatif de la gangue en terme de conductivité électrique est atténué. Les fils à bas taux de silicium ont permis de vérifier ce résultat. La Figure VII.22 présente l'évolution du taux de CO₂ causant la transition vers le régime globulaire en fonction de la proportion de silicium dans le fil-électrode. Les résultats sont donnés pour deux courants différents. On constate que l'évolution n'est pas linéaire.

Sur le plan électrique, on peut donc considérer que la diminution du taux de silicium conduit à réduire la résistivité électrique de la gangue de manière significative. Cependant pour le fil contenant un taux minimal (G004 : 0,001% Si) on observe cette fois une diminution des performances qui ne correspond pas à la courbe tracée ci-dessous. On ne doit donc pas attendre une amélioration continue par abaissement ou annulation du taux de silicium. Ce phénomène peut être du à une perte de stabilité de l'arc sur le plan métallurgique, en présence d'un taux de silicium trop bas. Ces propriétés seront étudiées dans le dernier paragraphe.

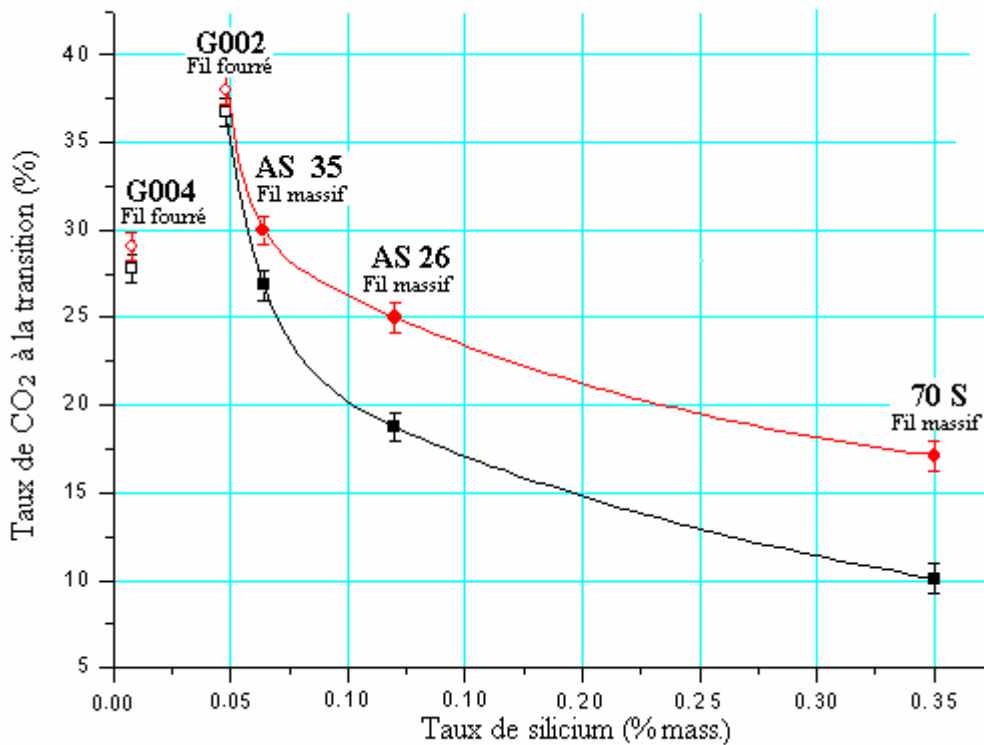


Figure VII.22 : Taux de CO₂ à la transition en fonction du taux de Silicium dans le fil
 [■ I = 330 A ; ● I = 410 A]

[Conditions expérimentales : $V_{fil} = 9\text{m/mn} / 12\text{m/mn}$ (fils massifs), $V_{fil} = 11,4\text{m/mn} / 15\text{m/mn}$ (fils fourrés) ; $D_g = 20\text{l/mn}$]

Les essais réalisés avec le titane ont montré que celui-ci se concentre effectivement dans la gangue dans les mêmes conditions que les autres éléments minoritaires. Pour un taux de CO₂ de 40%, la concentration en titane (8%) dans la gangue est ainsi voisine de celle du silicium, tandis que dans le fil de référence, pour des conditions similaires le taux de silicium est deux fois plus important (16%). Comparé à celle de la silice, la conductivité d'un oxyde de titane est plus élevée. Cependant le maintien de ces performances n'est pas assuré à haute température dans l'état liquide, et la phase TiO₂ (si elle est formée) présente un point de fusion particulièrement bas (573 K) : on peut même supposer qu'elle se vaporise, ce qui est confirmé par l'observation de raies intenses du titane dans l'arc (voir chapitre VII).

Les performances des différents fils au titane, qu'il s'agisse des deux fils massifs (AS 42 et S₂MoTi) ou du fil fourré (G003) sont en effet peu différentes de celles du fil de référence. On peut donc en déduire que la présence de l'oxyde de titane n'améliore pas significativement les caractéristiques électriques de la gangue. Outre l'influence de l'état physique de l'oxyde, il faut également tenir compte des différentes phases Ti-O potentiellement formées et présentant des caractéristiques électriques différentes, imposées par le système thermodynamique. La détection qualitative des éléments (oxygène, fer, titane) par EDS ne permet pas de conclure quant à l'oxyde effectivement présent dans l'échantillon.

Le zirconium est également susceptible de former un oxyde conducteur à haute température, la zircone ZrO₂. Le fil contenant cet élément (G005) présente, pour un taux de silicium comparable au fil AS 26, un meilleur comportement. Notons que ZrO₂ a un point de fusion très élevé (2950 K) On peut donc considérer que la zircone peut rester partiellement solide et constituer un matériau plus conducteur que la silice ou l'oxyde de fer liquide

Des recherches sur le comportement à haute température, notamment en terme de conductivité électrique, d'oxydes contenant du lanthane ont été présentées par plusieurs auteurs [150, 151, 152]. Ces oxydes pourraient présenter des propriétés similaires à un métal cristallisé même en phase fondue. Le mélange de zirconium et de lanthane dans le fil G006 a donc été réalisé dans le but de former un oxyde multiple de ce type, à base de lanthane, zirconium et oxygène.

Les résultats pour ce type de fil ont malheureusement été peu concluants. L'analyse au microscope a montré que plusieurs phases oxydées étaient présentes, mais celles attendues contenant le lanthane et le zirconium en proportions équivalentes étaient minoritaires. Les conditions thermodynamiques lors du processus de soudage ne sont certainement pas favorables aux phases recherchées

3.6. Influence des caractéristiques mécaniques

Les forces électromagnétiques constituent l'un des deux principaux phénomènes impliqués dans le détachement des gouttes. La modification de leur signe (de force de détachement à force d'attachement) est généralement utilisée pour expliquer le passage en régime globulaire. On peut également étudier l'influence du phénomène empêchant dans tous les cas le détachement. La tension de surface est généralement invoquée. Dans le fil de référence 70 S, on observe des oxydes de fer, manganèse et silicium. L'effet sur la conductivité électrique de la silice et ses conséquences sur la géométrie des lignes de courant (donc des forces électromagnétiques) a été présenté au paragraphe précédent. Pour ce qui est de la tension de surface, la première hypothèse pour expliquer l'influence de la gangue lorsque du CO₂ est ajouté serait de supposer que la tension augmente avec le pourcentage ajouté. Or il se trouve que le CO₂ produit l'effet inverse. Son utilisation en soudage MAG permet d'obtenir un meilleur mouillage du cordon par une diminution de la tension de surface du métal fondu. Ce phénomène est dû à l'action de l'oxygène, la tension de surface passe de 1750 mN/m pour le fer pur fondu à 1150 mN/m lors d'un ajout de 0,03% d'oxygène dans le fer; le carbone n'a par contre pas d'effet [117]. De plus un ajout de 5% de SiO₂ dans le fer cause une réduction de 20% de la tension de surface [153], et l'ajout de silice à l'oxyde FeO produit un effet comparable, la tension de surface diminuant proportionnellement à la fraction molaire de SiO₂ dans FeO [154],

Les oxydes considérés ont en général une température de fusion plus élevée que le fer. On peut supposer que la gangue, chauffée par le plasma et refroidie au contact du métal présente une viscosité plus élevée que celle du métal. Celle-ci augmente en effet lorsque la température diminue, par exemple pour l'oxyde de fer FeO, elle double lorsque la température passe de 1230 K à 1130 K [155]. Il se trouve de plus que les oxydes ont des viscosités beaucoup plus importantes que le fer : la viscosité de FeO liquide (0,03 à 0,05 Pa.s) est environ 25 fois plus élevée que celle du fer liquide (0,001 Pa.s). La viscosité de la silice, même fondue à 2000 K, est encore 500 plus élevée (0,5 Pa.s) [156]. Enfin, un ajout de 40% de silice SiO₂ dans l'oxyde de fer FeO triple la viscosité [157].

On peut donc formuler l'hypothèse que la viscosité de la gangue, qui est très élevée empêche le métal de s'écouler facilement et de former une veine liquide, conduisant à la formation de grosses gouttes se détachant sous l'effet de la gravité notamment. L'intérêt de la diminution de la quantité de silicium sur le maintien du régime de pulvérisation axiale tiendrait à la réduction de la viscosité de l'enveloppe de la goutte de métal fondu et en particulier de la gangue.

Les expériences réalisées avec les fils contenant des alcalins confirment ces hypothèses : si la température de fusion est plus basse, le métal et les phases oxydées sont plus fluides pour une même température de l'arc (donc un même courant, la température y étant proportionnelle), ce qui favorise le détachement des gouttes. L'analyse des enregistrements vidéo a montré que la gangue présentait, dans le cas général, des mouvements importants à la surface du métal fondu. On peut donc supposer que si sa viscosité est réduite sa cohésion sera plus faible et elle ne jouera plus son rôle d'enveloppe favorisant la formation de gouttes de diamètre important. Des morceaux de métal se détachent alors dès que leur volume dépasse une valeur limite beaucoup plus faible que dans le cas d'une gangue

plus visqueuse. Ce serait donc la modification de fluidité de la gangue qui modifierait la taille des gouttes plutôt que la variation de la tension de surface. Cette dernière force reste cependant déterminante dans la forme de la goutte, quel que soit le régime de fonctionnement considéré.

Par ailleurs un autre phénomène a été mis en évidence avec les fils fortement chargés en alcalins : sur les échantillons solidifiés une partie des oxydes sont remontés par capillarité au-dessus de la goutte, dans la zone où le flux avait fondu entre les parois du feuillard encore solide [Cf. Figure VII.16]. Comme la densité des oxydes est plus faible que celle du fer [147, 149], on peut donc penser que du fait d'une plus grande fluidité du métal ils remontent vers le haut du fil, plutôt que de surnager en surface de la goutte. Il en résulte donc que la gangue est moins abondante, puisque les oxydes présents en surface ne représentent qu'une fraction de tous ceux formés lors de la fusion du fil, sous l'effet oxydant du gaz de protection.

3.7. Conclusion

L'étude de la gangue représente la principale originalité de l'approche utilisée au cours de ma thèse, puisque son observation n'avait jamais été réalisée avant l'étude menée par S. Zielinska [1]. Les travaux entrepris ont permis de préciser les hypothèses concernant son rôle et les moyens de s'affranchir de ses effets pénalisants. Par ailleurs il a été possible pour la première fois d'observer cette gangue pendant le soudage.

L'interprétation du passage en régime globulaire par la formation d'une gangue d'oxydes empêchant le détachement des fines gouttes représente une alternative innovante par rapport à l'explication couramment admise basée uniquement sur l'effet des forces électromagnétiques, et évoquée au chapitre précédent. Cependant les deux approches ne sont pas incompatibles puisque l'aspect isolant de la gangue peut expliquer la modification de la géométrie des lignes de courant et donc le changement de signe des forces électromagnétiques. Les résultats obtenus montrent que de bonnes performances, en termes de possibilité d'obtenir le régime de pulvérisation axiale à faible courant et à fort taux de CO₂, sont obtenues avec des oxydes à haut point de fusion (zirconium notamment). Les plus significatives ont donc été obtenues en agissant sur les paramètres physico-chimiques (température de fusion, viscosité) de l'électrode, liés directement à la formation et aux propriétés de la gangue.

VIII - SPECTROSCOPIE DU PLASMA

1. INTRODUCTION

L'étude spectroscopique de l'arc est le seul moyen d'accéder à des données comme la température ou la densité électronique du plasma. La spectroscopie optique d'émission permet de mesurer les différents paramètres avec un dispositif relativement simple.

Si l'étude de l'arc de soudage TIG, généralement très stable et constitué d'un seul élément (argon), est relativement aisée, il n'en est pas de même avec le plasma généré en soudage MIG-MAG : la composition est alors plus complexe du fait de la présence éventuelle d'autres éléments injectés directement dans le gaz (CO_2) ou issus des électrodes et des gouttes transférées dans la colonne (vapeurs métalliques).

Les études spectroscopiques présentées dans la littérature traitent donc le plus souvent du procédé TIG, et peu de données expérimentales sont disponibles concernant le soudage MIG-MAG. Lancaster rapporte, dans un livre [158] des données issues de documents de l'International Institute of Welding (IIW) pour l'arc MIG avec une électrode en acier : dans la partie centrale du plasma (zone la plus lumineuse de l'arc), la température serait de 6000 K à 7000 K avec une valeur maximale de 13000 K hors de l'axe de la colonne ; cependant les conditions expérimentales des mesures (hauteur d'arc, courant) ne sont pas rappelées.

Les résultats des calculs numériques présentés notamment dans les publications de Haidar [51 à 57] prévoient une température maximale de plus de 20000 K au centre de la colonne, sous l'anode. Pourtant, les résultats de l'analyse spectroscopique présentée dans la thèse de S. Zielinska [1], donnent des valeurs inférieures et indiquent l'existence d'une chute de température selon l'axe de l'arc. Ses mesures ont été effectuées à différentes distances de la cathode dans le cas d'un fonctionnement à 330 A sous argon pur, argon + 5% CO_2 et argon + 20% CO_2 , afin de caractériser l'évolution globale de la température dans l'arc. Pour compléter ces mesures et fournir une base de référence détaillée pour l'élaboration et la validation de modèles, nous avons étendu l'étude de S.Zielinska à une dizaine de hauteurs intermédiaires dans l'arc, pour différents courants et différents gaz de mélange. Nous avons également cherché à évaluer l'état d'équilibre du plasma : en effet, la plupart des modèles élaborés à ce jour, se placent dans l'hypothèse de l'existence de l'équilibre thermodynamique local (ETL). Or certains des résultats de S.Zielinska (existence d'une ionisation résiduelle des atomes de fer en périphérie de la colonne d'arc par effet Penning) laissent supposer que cette hypothèse pourrait être mise en défaut, au moins dans certaines zones de la colonne de plasma. Par contre, dans les zones où l'ETL peut être admis, la spectroscopie optique d'émission permet de déterminer localement la proportion de vapeurs métalliques dans le milieu plasmagène, et, à termes, de remonter aux caractéristiques thermodynamiques et aux coefficients de transport du plasma.

2. ETUDE DU SPECTRE GLOBAL DE L'ARC

Le spectre de l'arc de soudage a été réalisé avec le spectromètre Méchelle de manière à obtenir rapidement les données sur une grande gamme spectrale. Les mesures ont été effectuées pour un courant de 330 ampères en soudage MIG (argon seul comme gaz de protection). Ces paramètres assurent une bonne stabilité de l'arc (régime de pulvérisation axiale) et limitent le nombre d'éléments présents dans le plasma, outre l'argon, à ceux apportés par le fil-électrode. Le spectre obtenu [Cf. Figure VIII.1] contient essentiellement des raies d'argon et de fer, avec un maximum d'émission dans une zone s'étendant du proche UV (350 nm) au vert (560 nm), ce qui est cohérent avec la couleur observable bleu-vert de l'arc.

La composition initiale des différents fils est connue, mais il est utile de connaître la répartition de ces éléments dans le plasma, ainsi que leur niveau d'ionisation. L'argon, étant

difficile à ioniser ($E_{\infty} = 15,7596$ eV [159] ; température supérieure à 15000 K), n'est présent dans l'arc que sous forme excitée. Par contre des raies du fer une fois ionisé (Fe II) sont observées dans l'arc, l'énergie d'ionisation du fer étant plus faible ($E_{\infty} = 7,9024$ eV [160]). Les différents fils utilisés ont été analysés pour mettre en évidence le comportement des éléments étudiés.

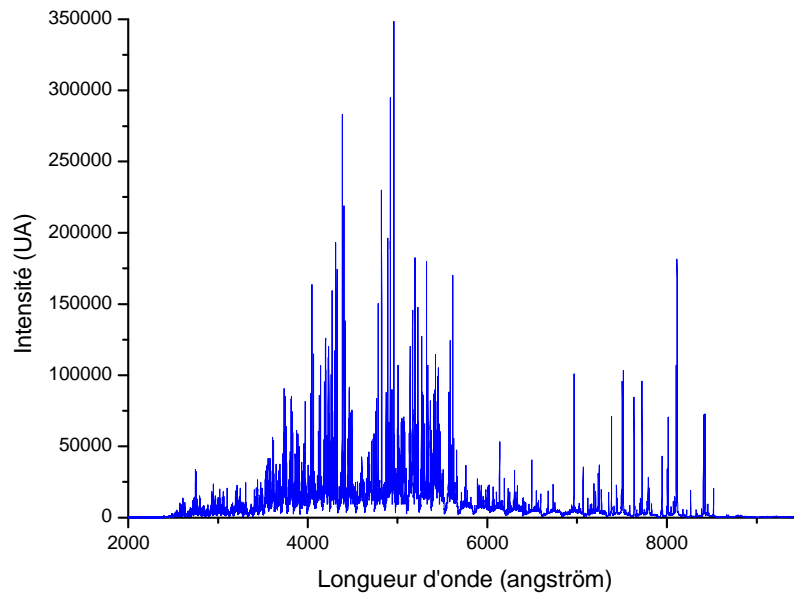


Figure VIII.1 : Spectre global du fil de référence 70 S
[Conditions expérimentales : argon, $I = 330$ A, $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

2.1. Le cas du titane

Trois fils contenant respectivement 0,1%, 0,3% et 1% de titane ($E_{\infty} = 6,8281$ eV [161]), ont été employés dont deux fils massifs (S₂MoTi et AS 42) et un fil fourré (G003). Le spectre présenté sur la Figure VIII.2 met en évidence des raies de titane excité Ti I et ionisé Ti II.

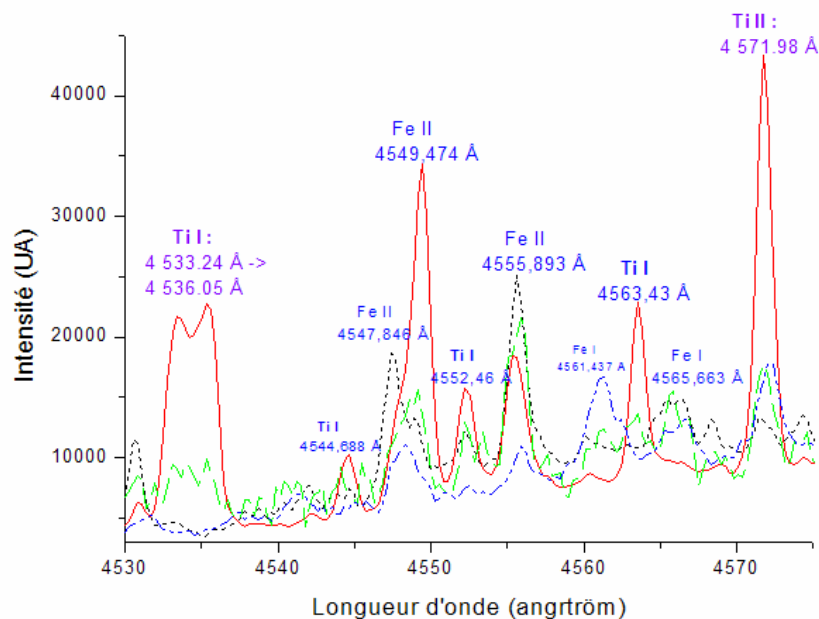


Figure VIII.2 : Spectres des fils 'Titane' pour $4530 \text{ \AA} < \lambda < 4575 \text{ \AA}$:
70 S (0,001% Ti : ····), G003 (1% Ti : -----), AS 42 (0,3% Ti : - - - - -) et S₂MoTi (0, 1% Ti : - · - · - · -)
[Conditions expérimentales : argon, $I = 330$ A $V_{fil} = 9$ m/mn (11,4 m/mn pour G003) ; $D_g = 20$ l/mn]

Le large pic visible à gauche correspond à la superposition des raies Ti I 4533,24 Å, 4534,78 Å, 4535.58 Å, 4535.92 Å et 4536,05 Å. Plus la teneur du fil en titane est importante et plus les raies de cet élément excité sont intenses. La raie du titane ionisé Ti II à 4571,98 Å est visible pour tous les trois fils. Pour le fil 70 S seules les raies du fer I et II sont visibles.

2.2. Le cas du zirconium

Deux fils fourrés contenant 0,3% de zirconium ($E_{\infty} = 6,6339$ eV, [162]) ont été utilisés, le fil G005 et le fil G006, le second se différenciant par la présence de lanthane ($E_{\infty} = 5,5769$ eV, [163]). Les raies de zirconium Zr I sont bien visibles dans le plasma [Cf. Figure VIII.3], de même que, dans une moindre mesure, quelques raies de Zr II [Cf. Figure VIII.4].

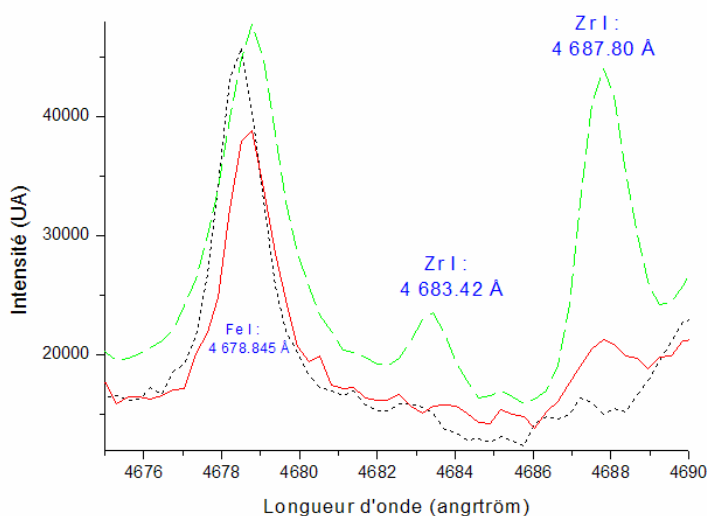


Figure VIII.3 : Spectres des fils 'Zirconium' pour $4675 \text{ \AA} < \lambda < 4690 \text{ \AA}$: 70 S (<0,001% Zr : \cdots), G005 (0,36% Zr : $-\cdot-\cdot-$) et G006 (0,33% Zr + 0,26% La : $-\cdot-\cdot-$) [Conditions expérimentales : argon, $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn (70 S : 9 m/mn) ; $D_g = 20$ l/mn]

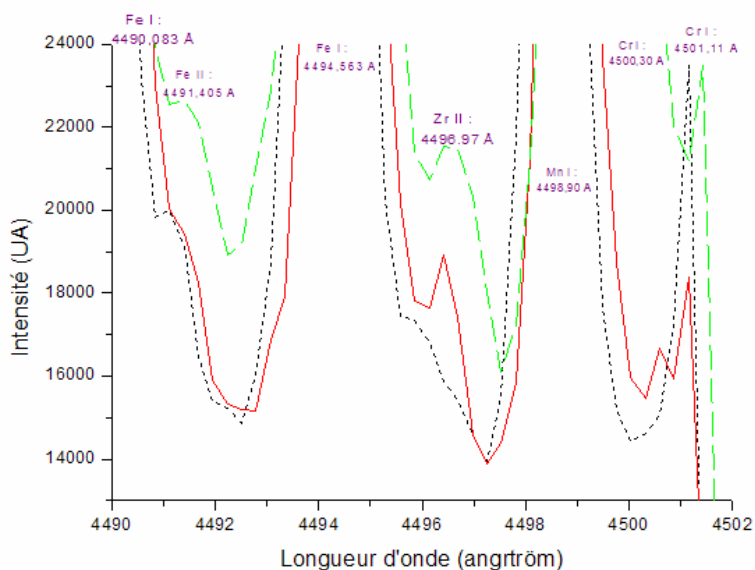


Figure VIII.4 : Spectres des fils 'Zirconium' pour $4490 \text{ \AA} < \lambda < 4502 \text{ \AA}$: 70 S (<0,001% Zr : \cdots), G005 (0,36% Zr : $-\cdot-\cdot-$) et G006 (0,33% Zr + 0,26% La : $-\cdot-\cdot-$) [Conditions expérimentales : argon, $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn (70 S : 9 m/mn) ; $D_g = 20$ l/mn]

2.3. Cas du lanthane

Le lanthane est un élément facilement ionisable ($E_{\infty} = 5,5769$ eV, [163]). Il n'est donc pas étonnant de l'observer principalement sous forme ionisée La II [Cf. Figure VIII.5] Les raies du lanthane excité La I, trop faibles et dissimulées par le spectre du Fer, n'ont par contre pas pu être observées clairement.

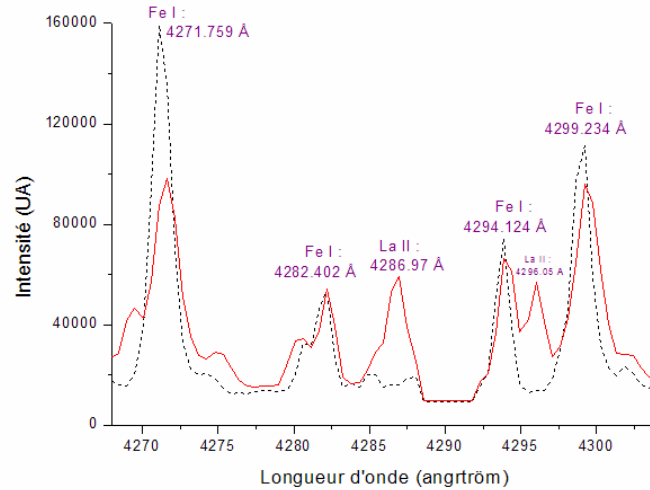


Figure VIII.5 : Spectres des fils 'Lanthane' pour $4268 \text{ \AA} < \lambda < 4303 \text{ \AA}$:
 70 S (<0,001% Zr :) et G006 (0,33% Zr + 0,26 La : -----)
 [Conditions expérimentales : argon, $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn (G006) / $V_{fil} = 9$ m/mn (70 S :); $D_g = 20$ l/mn]

2.4. Cas du lithium

Le lithium est également un élément facilement ionisable ($E_{\infty} = 5,3917$ eV, [164]) : il a été observé, pour tous les fils fourrés qui en contenaient (Mégafil, G007, G010 et G012), notamment dans le proche infrarouge [Cf. Figure VIII.6].

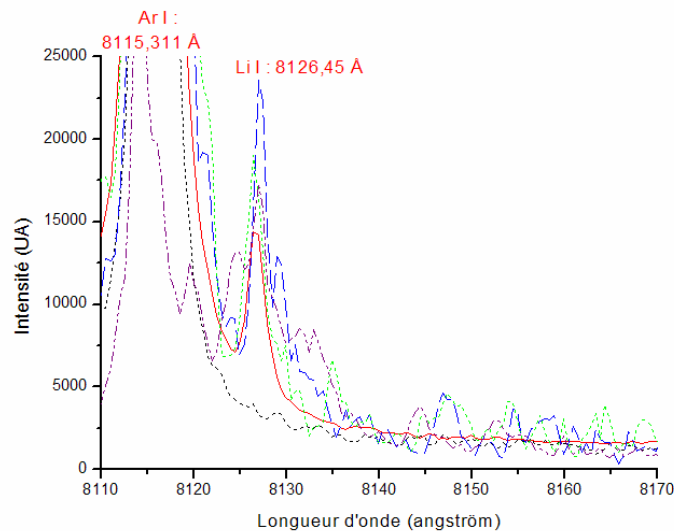


Figure VIII.6 : Spectres des fils 'Lithium' pour $8110 \text{ \AA} < \lambda < 8170 \text{ \AA}$:
 70 S (.....), Mégafil (0,017% Li + 0,13% Na + 0,46% K : -----), G007 (0,005% Li : - - - - -),
 G010 (0,005% Li + 0,093% K : - - - - -) et G012 (0,143% Li : - - - - -)
 [Conditions expérimentales : argon, $I = 330$ A $V_{fil} = 11,4$ m/mn (70 S : 9 m/mn); $D_g = 20$ l/mn]

2.5. Cas du sodium

Des raies intenses de Na I sont visibles dans le spectre émis en soudage avec les fils contenant du sodium ($E_{\infty} = 5,1391$ eV, [165]) [Cf. Figure VIII.7]. Elles se distinguent nettement par rapport au spectre du fil de référence 70 S. La raie observable pour ce dernier peut être attribuée au vanadium, le fil en contenant à l'état de traces (0,002% V)

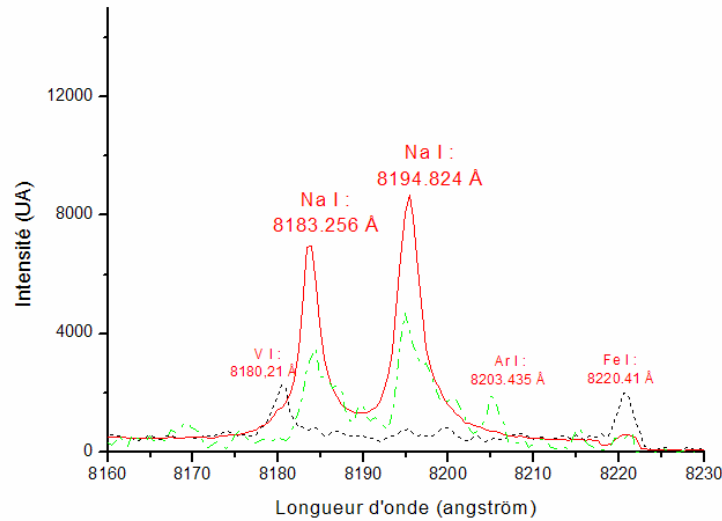


Figure VIII.7 : Spectres des fils 'Sodium' pour $8160 \text{ \AA} < \lambda < 8230 \text{ \AA}$:
 70 S (0,002% V : \cdots), Mégafil (0,017% Li + 0,13% Na + 0,46% K : $-----$) et G008 (0,042% Na : $-----$)
 [Conditions expérimentales : argon, $I = 330$ A, $V_{fil} = 11,4$ m/mn (70 S : 9 m/mn) ; $D_g = 20$ l/mn]

2.6. Cas du potassium

Le potassium est très facilement ionisable ($E_{\infty} = 4,3407$ eV, [166]) mais présente peu de raies intenses (K I ou K II) observables dans la gamme de longueurs d'onde étudiée : la raie à $6911,08 \text{ \AA}$ est nettement visible pour le Mégafil, mais plus difficilement pour les autres fils fourrés contenant cet élément en plus faible quantité [Cf. Figure VIII.8].

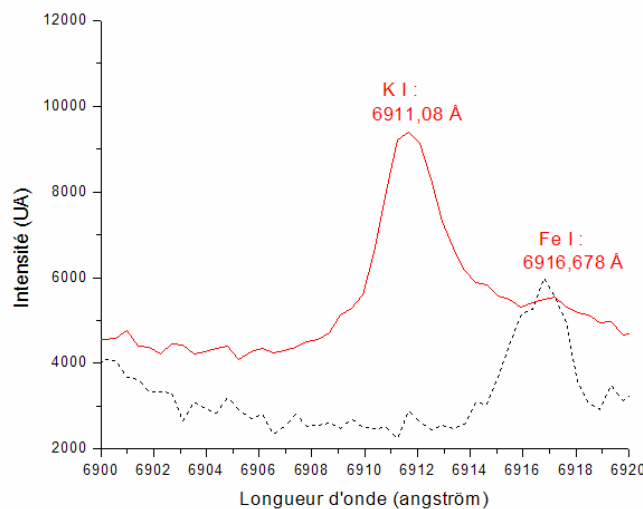


Figure VIII.8 : Spectres des fils 'Potassium' pour $6900 \text{ \AA} < \lambda < 6920 \text{ \AA}$
 70 S (\cdots) et Mégafil (0,017% Li + 0,13% Na + 0,46% K : $-----$)
 [Conditions expérimentales : argon, $I = 330$ A $V_{fil} = 11,4$ m/mn (Mégafil) / $V_{fil} = 9$ m/mn (70 S :) ; $D_g = 20$ l/mn]

3. ETUDE DE LA TEMPERATURE ET DE LA DENSITE ELECTRONIQUE

3.1. Méthodologie

L'étude de l'arc a été réalisée dans le but d'obtenir des données sur un maillage de l'espace le plus fin possible. Compte tenu du réglage de la largeur de la fente d'entrée du spectromètre (40 μm) et du grandissement du système optique, la tranche visée dans l'arc a une épaisseur de 100 μm . Cette épaisseur définit la résolution maximale qu'il est possible d'obtenir sur la hauteur. Les mesures ont été réalisées avec un pas de 0,5 mm (soit 5 fois la résolution maximale), la position étant mesurée avec une précision de l'ordre de 0,1 mm.

Pour ce qui est de la résolution sur le rayon, la précision dépend de la distance entre deux des pixels et du grandissement utilisé. Avec les valeurs employées la résolution est donc de (62,5 \pm 0,1) μm , et la largeur maximale enregistrable est de 1,6 cm [Cf. Figure IV.4, page 58].

Plutôt que de moyenniser les enregistrements sur un long temps d'exposition, nous avons préféré réaliser plusieurs acquisitions successives avec des expositions relativement faibles de façon à pouvoir rejeter *a posteriori* les données inutilisables. En particulier, le passage des gouttes dans le plasma peut perturber l'enregistrement en dissimulant une partie du rayonnement émis par l'arc et donc invalider tout diagnostic : nous avons rejeté systématiquement les enregistrements où un tel phénomène était manifestement visible (trace noire au centre de la matrice CCD).

Le diagnostic du plasma a été réalisé par deux méthodes [Cf. section IV.3.4, page 64] : la méthode de Sola, qui permet de déterminer simultanément densité et température électronique à partir de l'élargissement des raies 5383,369 Å de Fe I et 6965,43 Å de Ar I indépendamment de toute hypothèse sur l'état d'équilibre du plasma ; et les graphes de Boltzmann qui permettent de déterminer la température d'excitation à partir de l'intensité de raies de Fe I dans l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique locale (ETL).

Si l'ETL est vérifié, dans le plasma, les deux méthodes doivent donner des valeurs de température comparables. Les écarts les plus importants entre les deux méthodes se manifestent essentiellement à la périphérie de la colonne, pour des températures typiquement inférieures à 7000 K, où l'ETL n'est certainement pas respecté. Par ailleurs, malgré les précautions prises, les données au voisinage de l'axe de la colonne, sont à prendre avec précaution en raison du passage des gouttes de métal liquide, qui peuvent dissimuler une partie du rayonnement de l'arc.

Néanmoins, ces deux méthodes sont marquées par des incertitudes sur T_e et N_e relativement importantes (> 10%) :

- En raison de l'impossibilité d'enregistrer en concordance de temps les raies d'Ar I et de Fe I pour l'application de la méthode de Sola : le diagnostic est toujours basé sur l'acquisition successive des spectres émis par l'arc dans les deux régions spectrales concernées, avec des conditions de soudage identiques.

Nous avons vérifié que la variation de l'intensité des raies au cours d'un essai donné, ne modifiait que peu leur élargissement, et avons donc utilisé pour le diagnostic les enregistrements les mieux résolus et les plus représentatifs pour effectuer le diagnostic par la méthode de Sola.

- En raison de la précision limitée des données disponibles dans la littérature concernant la dépendance en température et densité des élargissements Stark des raies 5383,369 Å de Fe I et 6965,43 Å de Ar I [Cf. section IV.3-4.ii, page 68] , mais aussi de la difficulté de détecter simultanément les deux raies dans toutes les zones du plasma (raie d'argon peu visible sur l'axe ; raie de fer peu visible en périphérie).
- D'autre part en raison des difficultés à isoler les raies de Fe I pour le diagramme de Boltzmann, parfois fortement auto-absorbée au centre de la colonne d'arc ou alors très faible dans la périphérie de l'arc.

Dans ce cas, alors que les principales raies choisies pour établir le graphe de Boltzmann pouvaient être enregistrées simultanément sur la même matrice CCD, le diagnostic est effectué en ‘moyennant’ les enregistrements sur l’ensemble des acquisitions pour tenter de s’affranchir des variations temporelles de l’intensité des raies au cours du processus.

La comparaison se fait visuellement en traçant les résultats issus des deux types de diagnostic sur le même graphique. Nous ne présenterons pas tous les cas étudiés, et seuls deux exemples sont donnés sur la Figure VIII.9 et la Figure VIII.10 : dans le premier cas il semble que l’ETL ne soit pas valide au centre de la colonne ($r < 0.5$ mm) et en périphérie ($r > 0.5$ mm) ; dans le second, il reste valide jusqu’à l’axe, mais les données n’ont pas permis d’obtenir des valeurs de T_e au-delà de $r \approx 4,5$ mm.

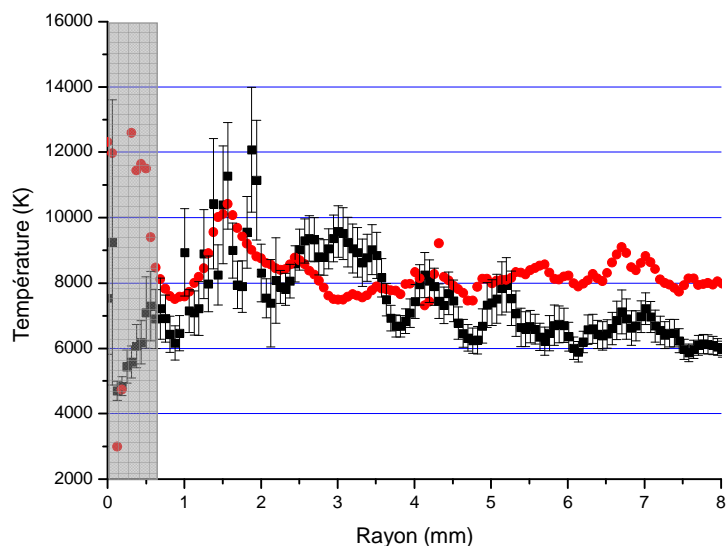


Figure VIII.9 : Répartition de température dans le plasma, pour $h = 3,5$ mm, sous argon pur, avec $I = 330$ A
 [■ Méthode de Sola ; ● Graphe de Boltzmann]
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

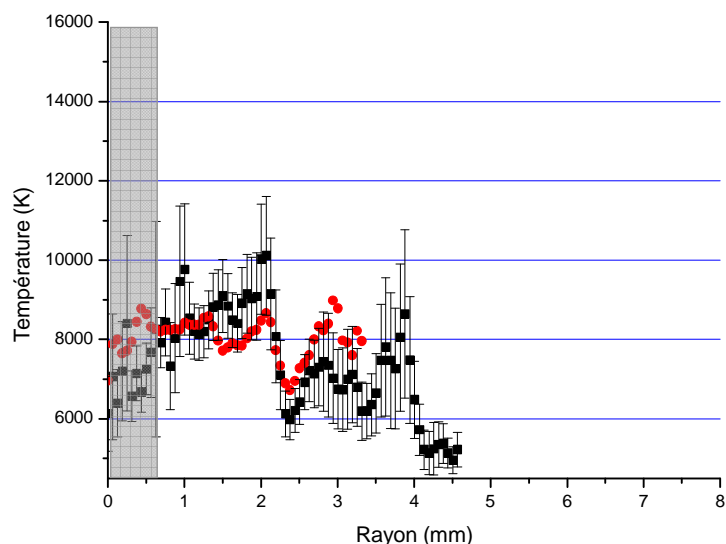


Figure VIII.10 : Répartition de température dans le plasma, pour $h = 4,0$ mm, sous argon pur, avec $I = 330$ A
 [■ Méthode de Sola ; ● Graphe de Boltzmann]
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

Une fois la validité de l'équilibre thermodynamique local vérifiée, il est alors possible d'estimer en chaque point de la colonne la proportion de fer dans le plasma : c'est un paramètre important pour la modélisation de l'arc, mais aussi pour remonter ensuite à toutes les grandeurs thermodynamiques utiles : conductivités électriques et thermiques, viscosité, etc...

La détermination de la proportion de fer dans le milieu plasmagène est réalisée en utilisant les répartitions de températures (Sola) dans les zones où l'ETL est vérifié, et les enregistrements des coefficients d'émissions d'une raie de fer et d'une raie d'argon [Cf. Section IV.34.iii, page 68] : les raies 5383.369 Å Fe I et 6965.43 Å Ar I, déjà utilisées pour le diagnostic par la méthode de Sola seront à nouveau mises à profit.

Les résultats seront donnés uniquement dans la zone de validité de l'ETL. La zone centrale de l'arc (grisée sur les figures suivantes) est également à considérer avec précaution, car elle est traversée par le métal liquide et, malgré les précautions prises, les enregistrements spectroscopiques peuvent en être altérés. Les proportions N_{Fe}/N_{Ar} obtenues sont toujours faibles ; pour une meilleure lisibilité des graphes, elles ont été multipliées par un facteur 10^5 sur les courbes présentées.

3.2. Fonctionnement sous argon pur et Fil massif 70 S

i. Répartition des température et densité électroniques dans la colonne

Dans le cas du soudage sous argon pur avec un courant de 330 ampères (régime de pulvérisation axiale), le profil de température présente un creux caractéristique au centre de la colonne. La température y diminue jusqu'à un minimum de l'ordre de 6000 à 7000 K, selon la hauteur dans l'arc. Dans le haut de la colonne ($h > 5,5$ mm), la présence de la veine de métal (qui peut s'étendre sur plus de 2 mm alors que la longueur d'arc est d'environ 7,7 mm) empêche la mesure de la température au centre de l'arc.

On distingue quatre zones, selon la hauteur d'observation h dans l'arc :

- Au voisinage de la cathode [$2 \leq h \leq 3,5$ mm : Figure VIII.11], la température présente un maximum de 9500 K à environ 3,2 mm de l'axe, et pour atteindre une valeur de l'ordre de 6500 K sur l'axe, proche de celle observée en périphérie de la colonne, en $r \approx 8$ mm. La densité électronique est maximale au centre (de l'ordre de $1,6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$) et décroît continûment lorsque r augmente ($N_e \approx 0,8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ en $r \approx 8$ mm).

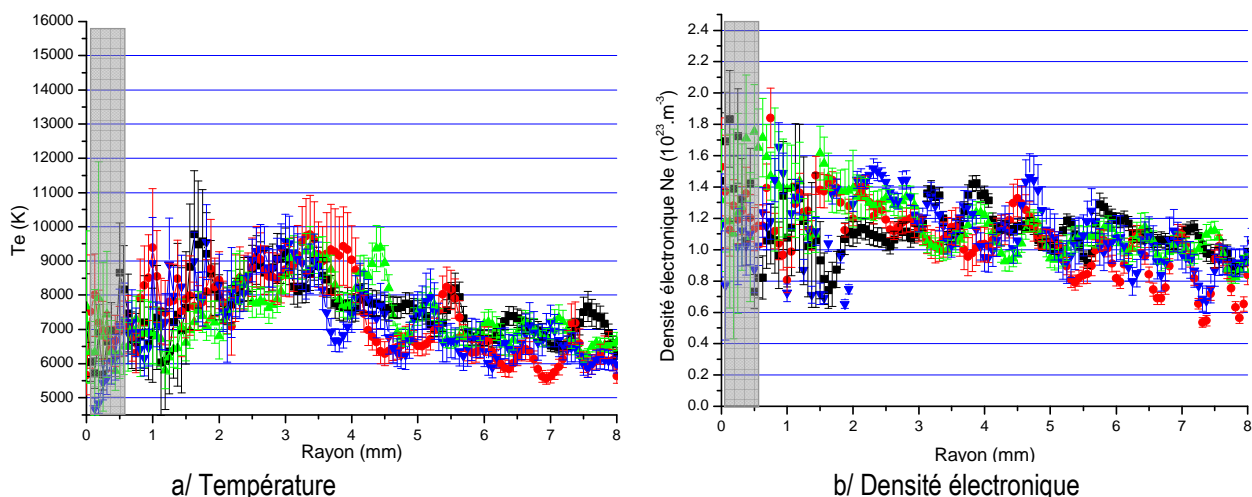


Figure VIII.11 : Diagnostic de l'arc de 2 à 3,5 mm – argon, $I = 330$ A.

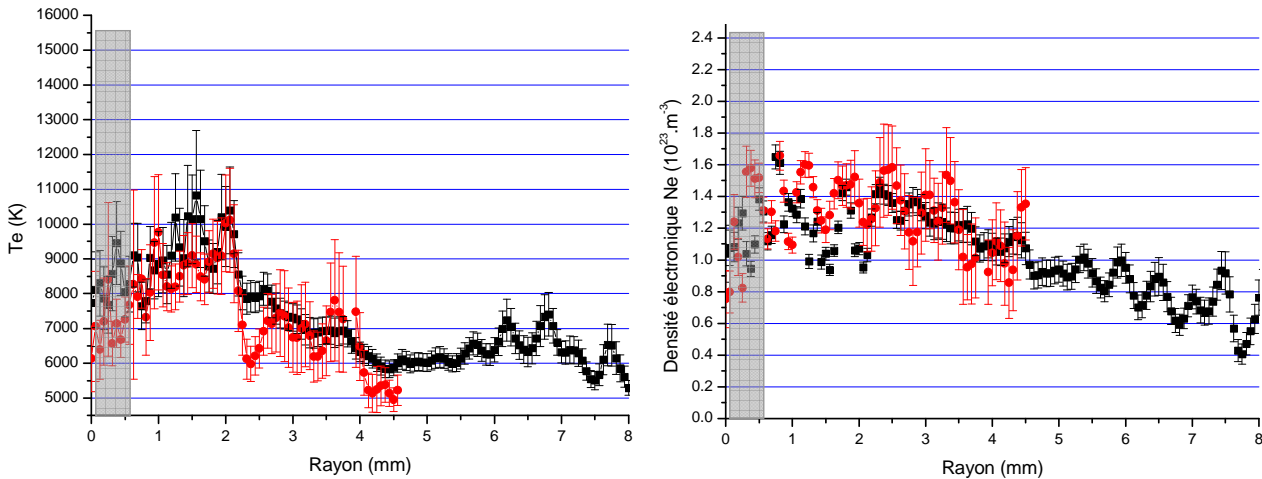
[■ $h = 2,0$ mm ; ● $h = 2,5$ mm ; ▲ $h = 3,0$ mm ; ▼ $h = 3,5$ mm]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn

- Pour une hauteur intermédiaire dans la colonne [$4,0 \leq h \leq 4,5$ mm : Figure VIII.12], la température sur l'axe est comprise entre 7000 et 8000 K, et passe par un maximum voisin de

10500 K à environ 1,7 mm de l'axe. En périphérie de la colonne ($r \geq 6$ mm), la température semble relativement constante, voisine de 6000 K. Il faut noter que la diminution de section de la colonne pour $h = 4,5$ mm y rend impossible les mesures spectroscopiques pour des rayons supérieurs à 4,5 mm.

La densité électronique reste maximale sur l'axe ($\approx 1,4 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$), mais semble présenter un plateau sur environ 3 mm avant de décroître.



a/ Température

b/ Densité électronique

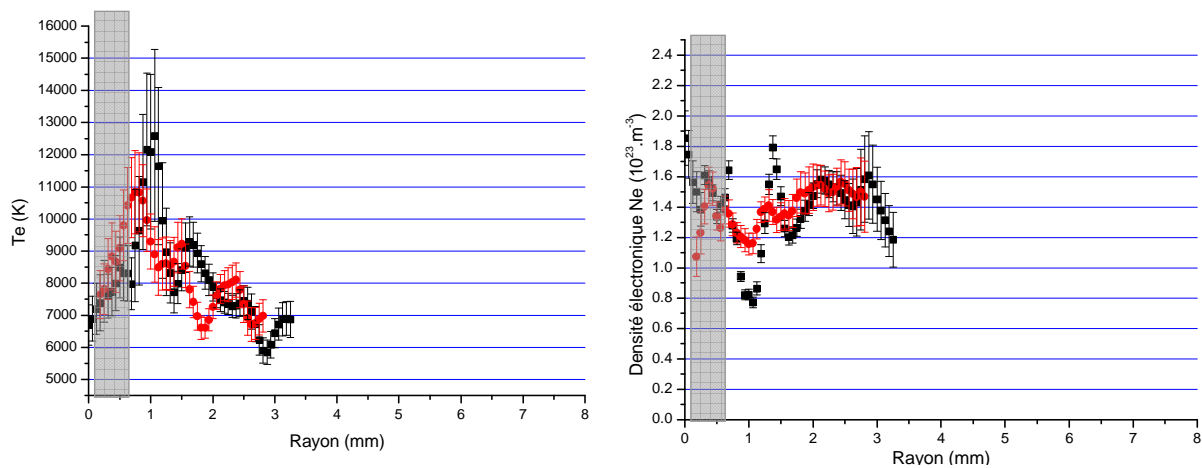
Figure VIII.12 : Diagnostic de l'arc de 4 à 4,5 mm – argon, $I = 330$ A.

[■ $h = 4,0$ mm ; ● $h = 4,5$ mm]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

- Dans le haut de la colonne [$5,0 \leq h \leq 5,5$ mm : Figure VIII.13], la section de l'arc diminue et les mesures ne sont possibles que jusqu'à environ 3 mm de l'axe. La température chute, non seulement vers le cœur de la colonne ($T_e \approx 7000$ K sur l'axe) mais également vers la périphérie ($T_e \approx 6000$ K en $r \approx 3$ mm).

La densité électronique est globalement plus élevée que dans les zones inférieures de la colonne, et semble rester quasiment constante.



a/ Température

b/ Densité électronique

Figure VIII.13 : Diagnostic de l'arc de 5 à 5,5 mm – argon, $I = 330$ A.

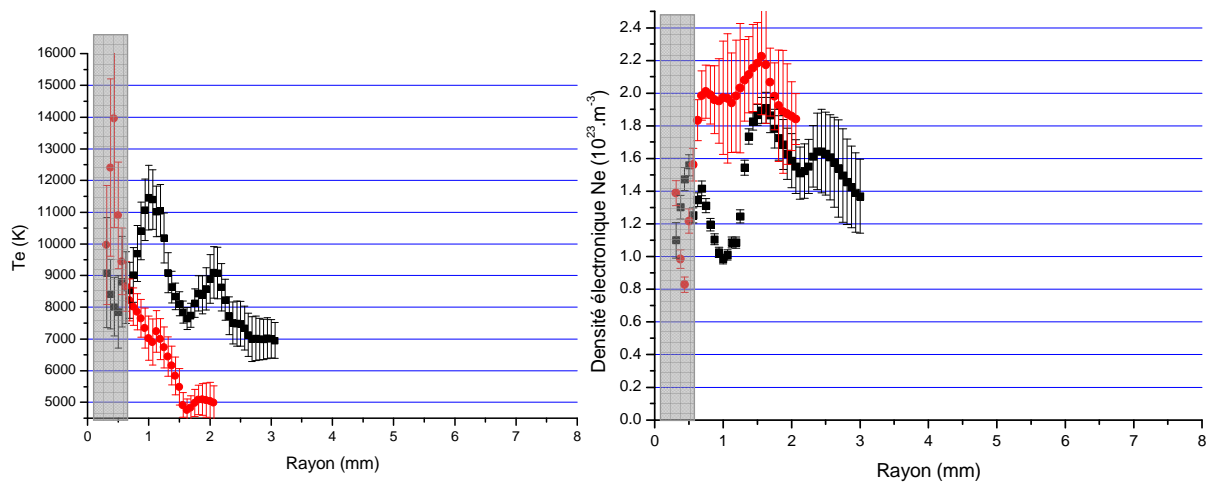
[■ $h = 5,0$ mm ; ● $h = 5,5$ mm]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

- Au voisinage de l'anode ($6,0 \leq h \leq 6,5$ mm), la veine de métal liquide est présente en permanence et empêche toute mesure spectroscopique en-dessous de $r \approx 0,4$ mm. La constriction de la colonne apparaît nettement sur les deux mesures réalisées [Cf. Figure VIII.14] et, alors qu'à 6,0 mm de la cathode la température présente toujours un maximum

hors-axe ($T_e \approx 11500$ K en $r \approx 1$ mm), elle semble maximum au voisinage immédiat de la veine de métal liquide si $h \geq 6,5$ mm ($T_e \approx 10000$ - 11000 K en $r \approx 0,4$ mm).

Dans cette zone, la densité électronique est nettement plus élevée que dans toutes les autres zones précédemment décrites, avec un maximum à $2,2 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$.



a/ Température

b/ Densité électronique

Figure VIII.14 : Diagnostic de l'arc de 6 à 6,5 mm – argon, $I = 330$ A.

[■ $h = 6,0$ mm ; ● $h = 6,5$ mm]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

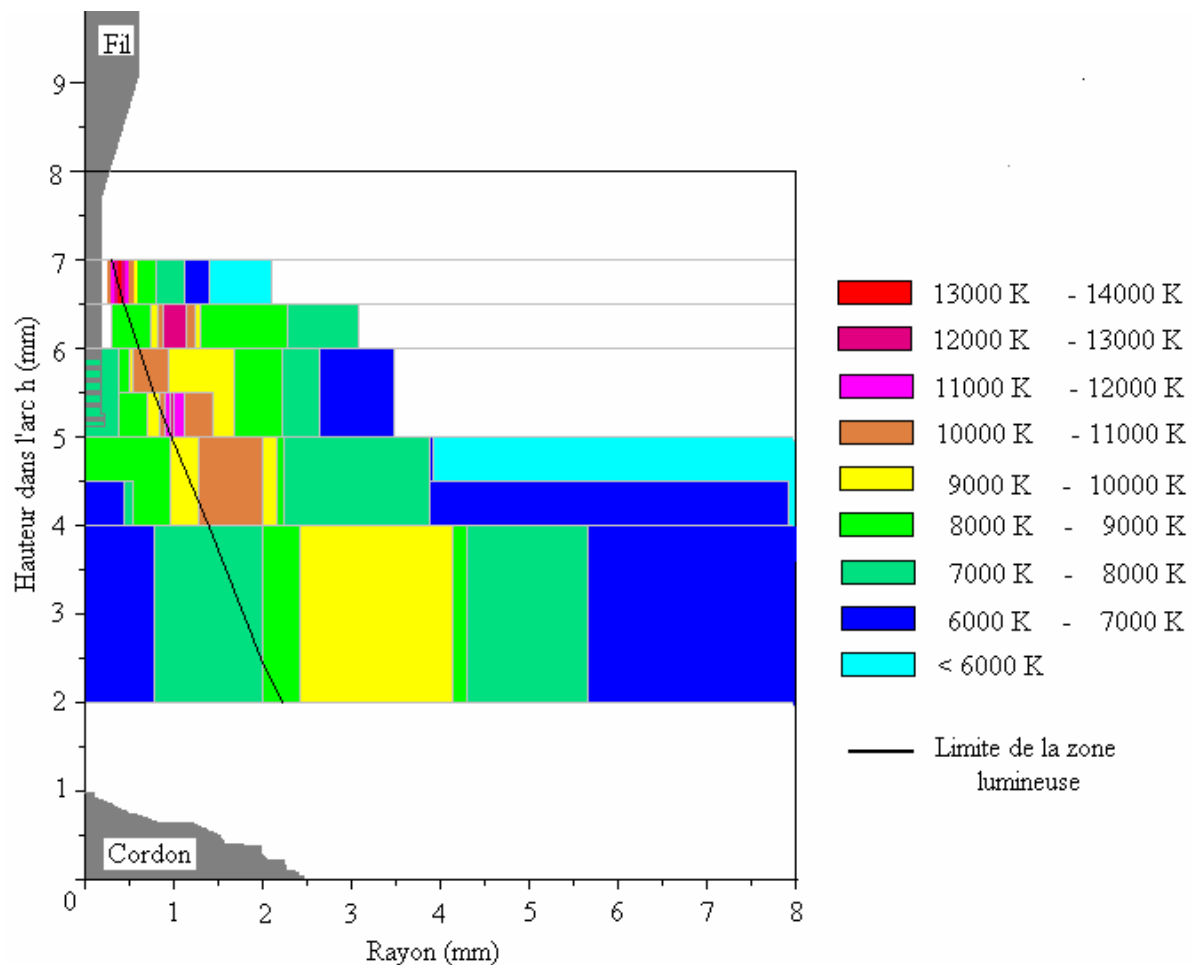


Figure VIII.15 : Représentation schématique des isothermes : soudage sous argon, $I = 330$ A.
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ /mn]

La Figure VIII.15 rassemble l'ensemble des informations décrites ci-dessus sous la forme d'un graphe schématique, où les isothermes sont codées selon différentes couleurs :

- Les températures représentées entre deux valeurs de h , correspondent à celles mesurées sur la section inférieure de la colonne.
- Le fil et la veine de métal liquide sont représentés en gris, à l'échelle par rapport aux hauteurs calculées. La position du cordon de soudure est donnée, son épaisseur sous le fil-anode est d'environ 1 mm : elle est due au dépôt des gouttes transférées dans l'arc.
- La position moyenne de la limite entre les deux zones du plasma observables à l'aide du filtre interférentiel bleu, est indiquée par le trait noir : elle correspond quasiment au maximum hors-axe de la température, qui est malgré tout légèrement décalé vers l'extérieur.

ii. Proportion de fer dans le plasma

La détermination de la proportion relative $\alpha = N_{Fe}/N_{Ar}$ de fer dans le plasma a été réalisée dans les zones où l'ETL, validé à partir de la concordance entre les résultats obtenus par le graphe de Boltzmann et la méthode de Sola, semblait vérifié : les résultats sont reportés sur la Figure VIII.16.

- Dans les régions proches de la cathode ($h \approx 2,0 - 2,5$ mm), la teneur en fer est relativement faible ($\alpha \approx 10^{-5}$) et homogène. Ce n'est plus le cas pour les hauteurs $h \approx 3,0 - 3,5$ mm auxquels on observe de brutales variations de α dans la zone centrale de l'arc, voire une accumulation du fer en deux points de la colonne lorsque $h \approx 3,5$ mm. Néanmoins, au-delà de $r \approx 2,3$ mm, les valeurs obtenues sont comparables : cette limite correspond à la transition entre la zone centrale la plus lumineuse de l'arc et la région périphérique.

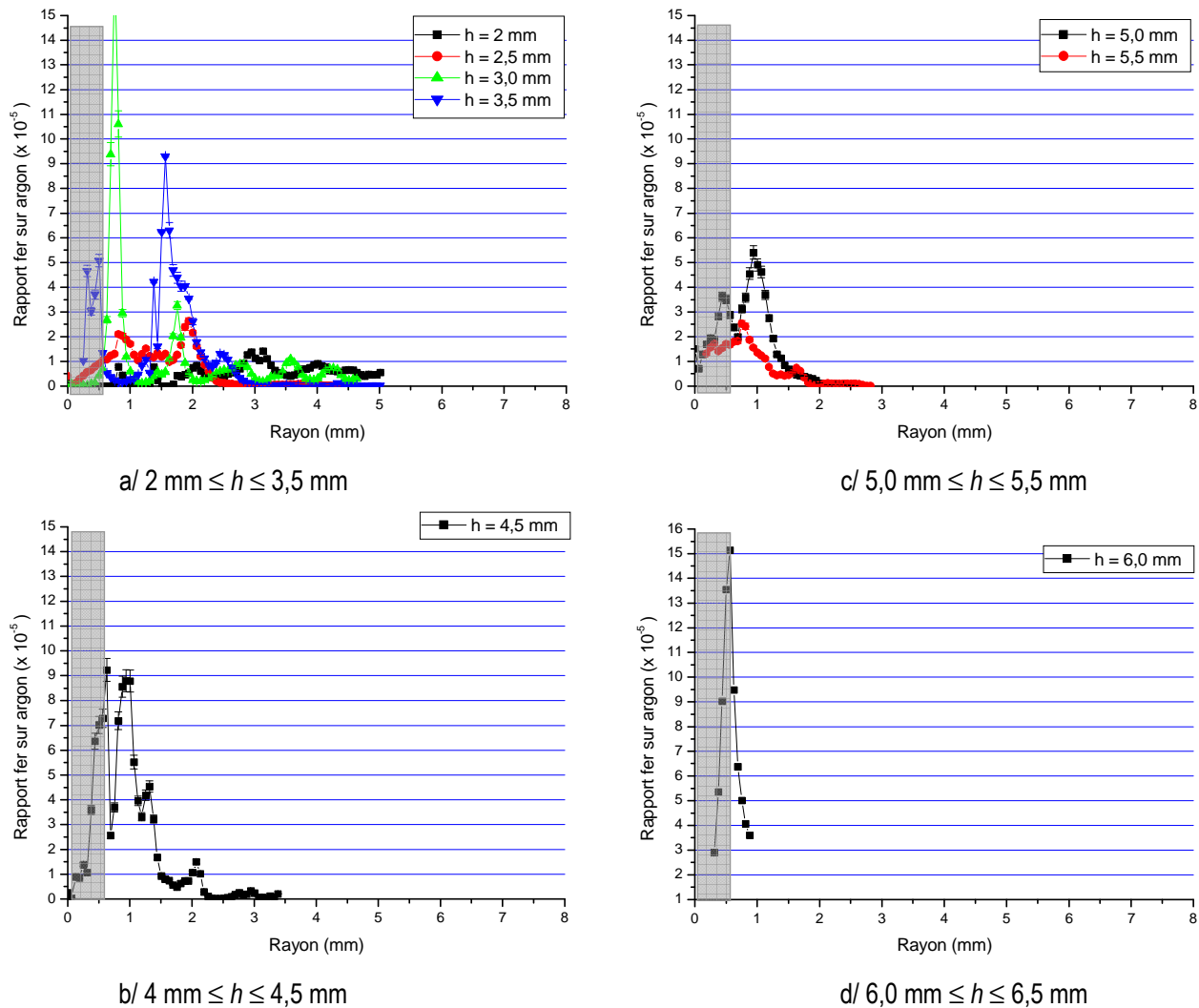


Figure VIII.16 : Rapport N_{Fe}/N_{Ar} dans l'arc – argon, $I = 330 \text{ A}$
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

- Les deux 'pics' de concentration du fer restent visibles jusqu'à des hauteurs dans l'arc proche de $h \approx 5,5$ mm : ils couvrent l'essentiel de la zone centrale de la colonne d'arc.
- La proportion de fer dans l'arc décroît à mesure qu'on se rapproche du fil-anode, puisque alors la goutte vient de se détacher et que les vapeurs métalliques n'ont pas eu le temps de diffuser vers l'extérieur de la colonne.
- Au voisinage immédiat de l'anode ($h \approx 6,0$ mm), la présence de la veine de métal liquide (jusqu'à un rayon de l'ordre de 0,2 mm) rend impossible la mesure au centre de l'arc, et la concentration en fer est probablement plus importante à la limite entre le métal fondu et le

plasma.

La forte proportion de fer ($\approx 1,5 \cdot 10^{-4}$) observée à $r \approx 0,6$ mm est très certainement liée à la présence permanente du métal liquide, alors que les perturbations provoquées par le métal au centre du plasma expliquent la chute apparente de α sur l'axe de la colonne.

Pour les distances $h \approx 6,5$ mm, la trop faible intensité des raies du fer utilisées pour le graphe de Boltzmann, rend impossible toute conclusion sur l'état d'équilibre du milieu, même si, compte tenu de la température de 13000 K déterminée par la méthode de Sola, l'ETL est probablement assuré.

Dans tous les cas, il y a concordance quasi-parfaite entre la zone où la concentration en fer est élevée, et la partie lumineuse de l'arc observé par cinématographie avec le filtre interférentiel bleu [Cf. Tableau VIII.1]

Hauteur au-dessus de la cathode (mm)	Limite de la zone lumineuse (mm)	Limite de la zone riche en fer (mm)	Ecart (%)
2.5	$2,0 \pm 0,02$	$2,0 \pm 0,1$	1,0
3.0	$1,8 \pm 0,02$	$1,9 \pm 0,1$	4,7
3.5	$1,6 \pm 0,02$	$1,7 \pm 0,1$	6,9
4.5	$1,2 \pm 0,02$	$1,2 \pm 0,1$	1,7
5.0	$1,0 \pm 0,02$	$1,0 \pm 0,1$	0,0
5.5	$0,8 \pm 0,02$	$0,8 \pm 0,1$	2,5
6.0	$0,6 \pm 0,02$	$0,6 \pm 0,1$	1,7

Tableau VIII.1 : Comparaison de la zone lumineuse et de la concentration en fer

3.3. Influence du taux de CO₂ utilisé dans le gaz de protection

L'étude précédente a été prolongée pour d'autres compositions du gaz de protection, en ajoutant du CO₂ à l'argon. L'étude a généralement été menée pour 5% de CO₂ pour chacune des zones présentées précédemment, mais la comparaison est également parfois donnée avec d'autres compositions plus riches en dioxyde de carbone (10 et 20% de CO₂ dans l'argon). Dans ce cas, la stabilité du plasma diminue, ce qui perturbe les mesures. Par ailleurs, non seulement la raie d'argon est toujours fortement atténuée, mais en plus, aux forts taux de CO₂, les raies de fer commencent à être auto-absorbées : dans ces conditions, la détermination du rapport $\alpha = N_{Fe}/N_{Ar}$ n'était pas possible.

i. Répartition des température et densité électroniques dans la colonne

Pour éviter de surcharger les courbes, les résultats sont présentés pour chaque hauteur individuelle. Pour alléger la présentation, compte tenu de la similarité entre les quatre hauteurs les plus basses (pour $h = 2$ mm, 2,5 mm, 3 mm et 3,5 mm) les résultats ne sont présentés que pour deux valeurs (3 et 3,5 mm) pour cette zone.

- Dans la zone cathodique ($2,0 \leq h \leq 3,5$ mm), le profil de température est très étalé, avec un minimum sur l'axe comparable à celui observé sous argon pur [Cf. Figure VIII.17_a]. Par contre, en périphérie, le plasma est nettement plus chaud ($T_e \approx 12000$ K) jusqu'à des distances supérieures à 5 mm du centre de la colonne. La densité électronique, quant à elle, est généralement plus faible que sous argon pur, et diminue lorsqu'on se rapproche de la cathode. [Cf. Figure VIII.17_b].

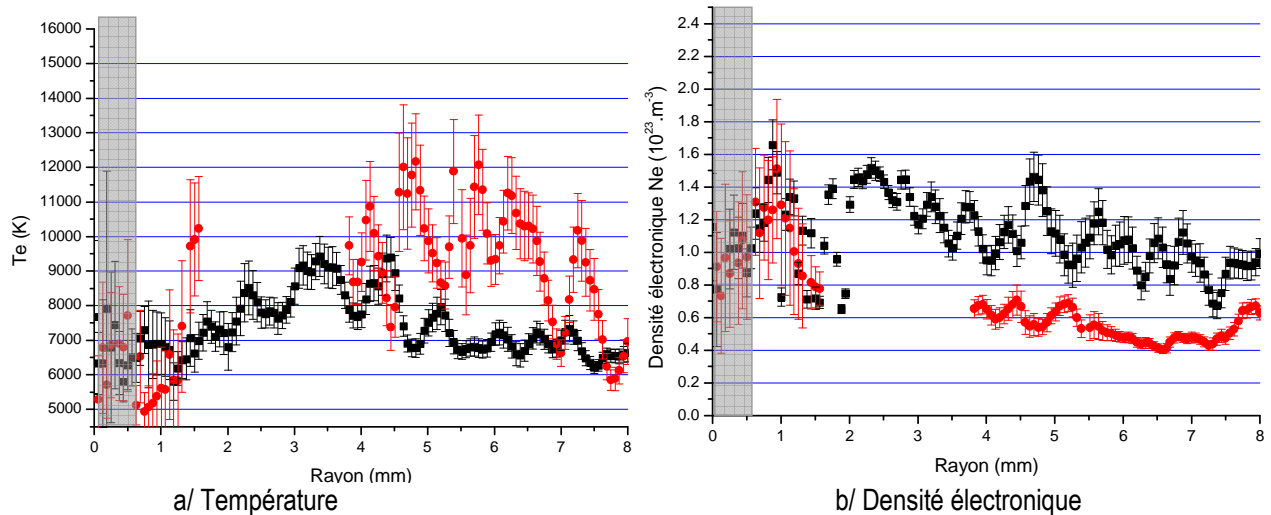


Figure VIII.17 : Diagnostic de l'arc pour $h = 3,0 \text{ mm} - I = 330 \text{ A}$.

[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

- Pour une hauteur de 3,5 mm la température électronique [Cf. Figure VIII.18_a] est également plus élevée pour le cas du CO_2 , mais la zone où la mesure n'a pu être effectuée correspond en grande partie à celle pour laquelle l'écart de température est le plus grand. On constate que les températures au centre et à la périphérie de la colonne sont comparables à celles mesurées sous argon. Pour ce qui est de la densité électronique [Cf. Figure VIII.18_b], l'écart entre les deux courbes semble plus faible, la densité électronique minimale mesurée sous argon à 8 mm de l'axe est de $0,8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$.

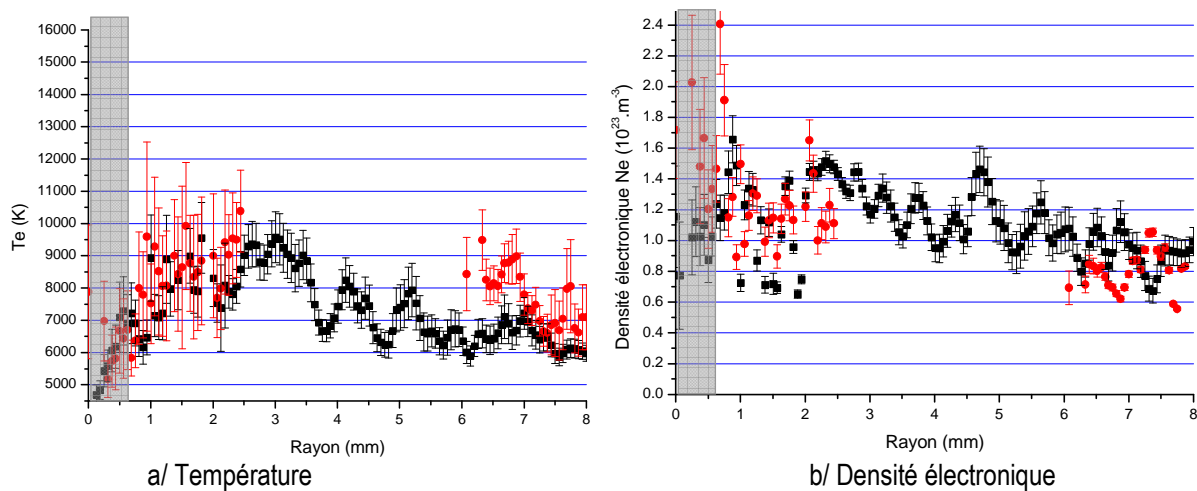


Figure VIII.18 : Diagnostic de l'arc pour $h = 3,5 \text{ mm} - I = 330 \text{ A}$.

[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

- Pour une hauteur de 4 mm, la mesure a également été effectuée pour un mélange contenant 20% de CO_2 . La température électronique [Cf. Figure VIII.19_a] est peu élevée par rapport à l'argon dans le cas du soudage avec 5% de CO_2 , mais le maximum est observé plus loin de l'axe (à 4 mm contre 2 mm). La chute de température est nettement visible au centre de la colonne pour les deux cas correspondant à la pulvérisation axiale (argon et argon + 5% CO_2) mais par contre elle n'est pas observée dans le cas du régime globulaire (argon + 20% CO_2). Pour ce qui est de la densité électronique [Cf. Figure VIII.19_b] on constate qu'elle est toujours plus faible avec 5% de CO_2 ($0,6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ contre $1,1 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ pour l'argon à 4 mm de l'axe). Pour 20% de CO_2 on observe des fluctuations plus importantes, mais la valeur

moyenne est globalement plus faible que dans le cas de l'argon seul.

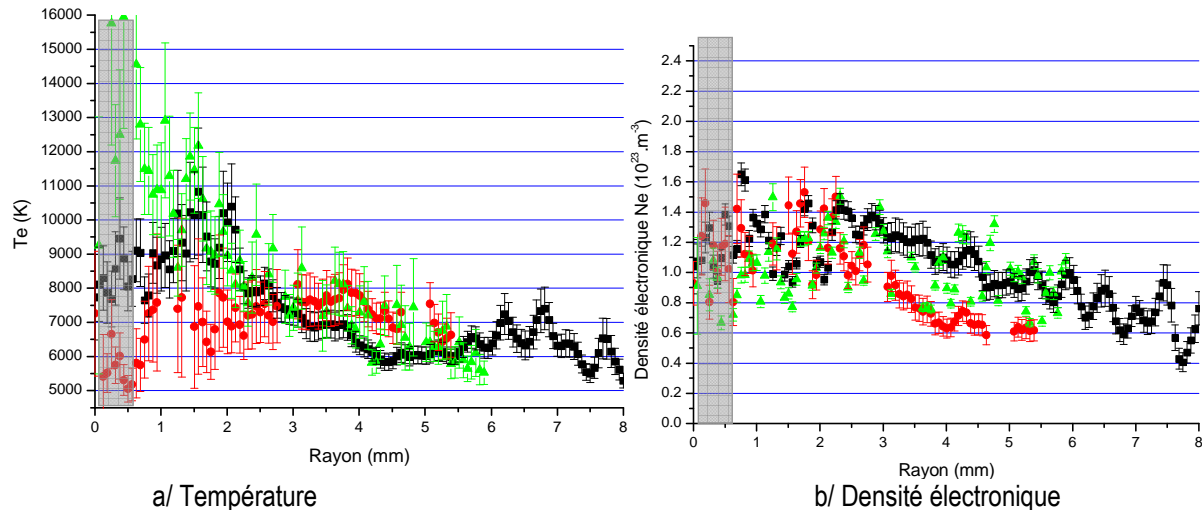


Figure VIII.19 : Diagnostic de l'arc pour $h = 4,0$ mm – $I = 330$ A.

[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2 ; ▲ Ar + 20% CO_2]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

- Pour une hauteur de 4,5 mm, la température électronique [Cf. Figure VIII.20_a] avec 5% de CO_2 est plus élevée (11000 K contre 10000 K) que dans le cas de l'argon et le maximum est observé plus loin de l'axe (à 4 mm contre 2 mm). Pour ce qui est de la densité électronique [Cf. Figure VIII.20_b] l'écart et plus faible par rapport au cas de l'argon, elle vaut $1,0 \cdot 10^{23} m^{-3}$ à 3 mm contre $1,3 \cdot 10^{23} m^{-3}$ pour ce gaz. Au centre de la colonne la densité électronique devient plus élevée ($2,0 \cdot 10^{23} m^{-3}$).

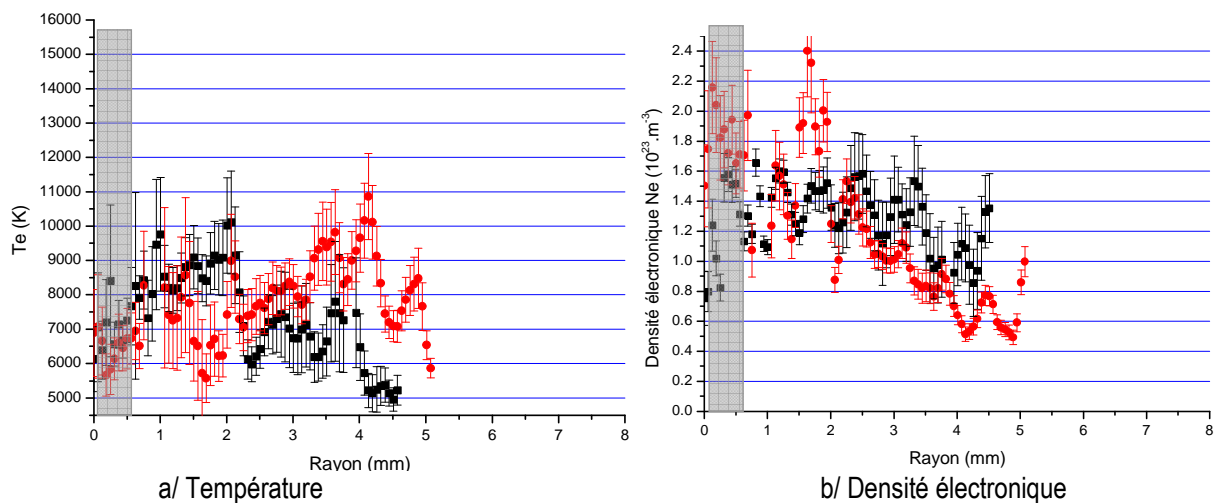


Figure VIII.20 : Diagnostic de l'arc pour $h = 4,5$ mm – $I = 330$ A.

[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

- Pour une hauteur de 5 mm, on observe toujours dans le cas du soudage avec 5% de CO_2 une température électronique [Cf. Figure VIII.21_a] plus élevée que pour l'argon pour un rayon plus important : la température et de l'ordre de 12000 K pour un rayon de 2 à 4 mm, alors que pour le gaz pur seul un pic à une valeur similaire est observé à 1 mm de l'axe. La densité électronique [Cf. Figure VIII.21_b] est, comme dans le cas de l'argon, élevée au niveau de centre de la colonne ($1,8 \cdot 10^{23} m^{-3}$ pour 5% de CO_2 , $1,6 \cdot 10^{23} m^{-3}$ pour l'argon), elle est ensuite plus faible pour un rayon plus important ($1,0 \cdot 10^{23} m^{-3}$ contre $1,4 \cdot 10^{23} m^{-3}$ à 2 mm de l'axe).

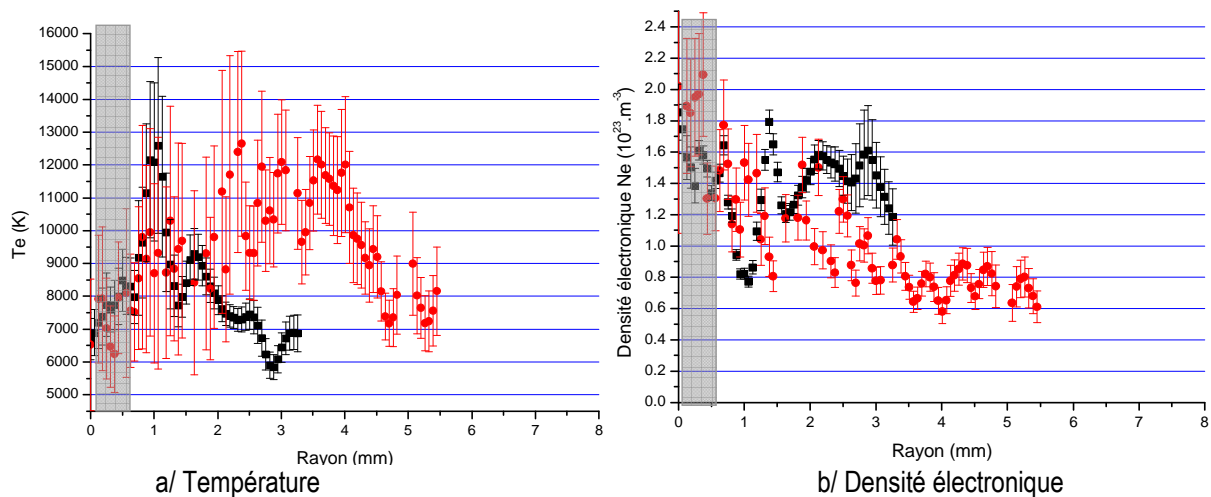


Figure VIII.21 : Diagnostic de l'arc pour $h = 5,0 \text{ mm} - I = 330 \text{ A}$.

[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

- C'est pour la hauteur de 5,5 mm que l'écart de température électronique est le plus marqué entre le soudage sous argon seul et avec 5% de CO_2 [Cf. Figure VIII.22_a]. La température électronique atteint presque 14000 K dans le second cas contre un maximum à 11000 K dans le premier. La densité électronique [Cf. Figure VIII.22_b] descend à $0,7 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ pour un rayon de 4 mm.

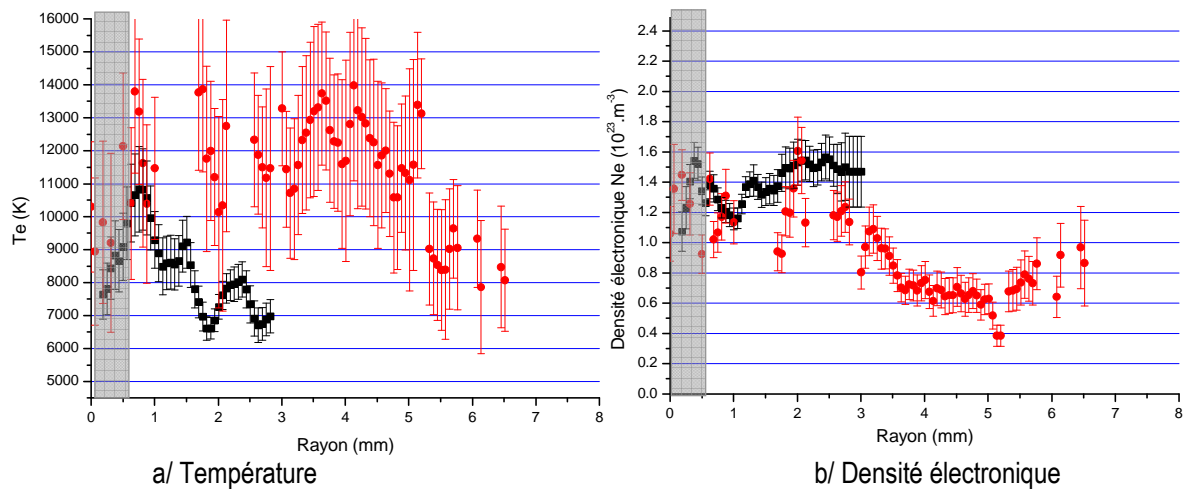


Figure VIII.22 : Diagnostic de l'arc pour $h = 5,5 \text{ mm} - I = 330 \text{ A}$.

[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

- A partir d'une hauteur de 6 mm, la veine de métal liquide est présente de manière permanente pour le soudage sous argon seul et avec 5% de CO_2 . Dans ce dernier cas, en effet, la hauteur d'arc est peu différente de la valeur sous argon (7,99 mm contre 7,7 mm) et la longueur minimale de la veine de métal liquide est similaire (2 mm). La température électronique mesurée est proche de la valeur mesurée sous argon (10000 à 11000 K) de même que la densité électronique [Cf. Figure VIII.23]. Cette dernière reste cependant plus faible que dans le cas de l'argon, $1,4 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ contre $1,7 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ à 2,5 mm de l'axe.

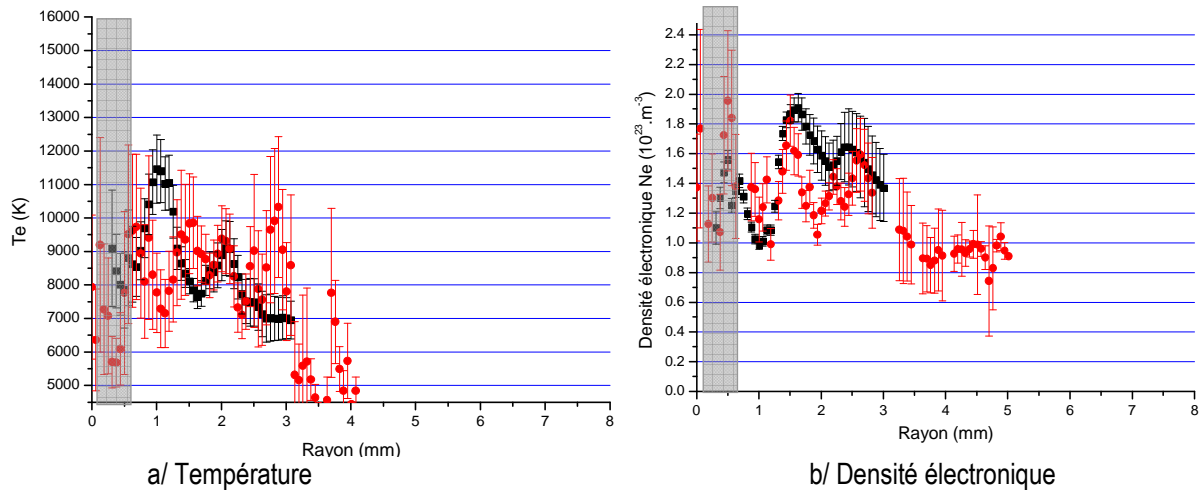


Figure VIII.23 : Diagnostic de l'arc pour $h = 6,0 \text{ mm} - I = 330 \text{ A}$.

[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

- Pour une hauteur de 6,5 mm, les mesures ont été effectuées pour 4 gaz différents : sous argon seul et avec 5, 10 et 20% de CO_2 . La veine de métal liquide n'est présente que pour les deux premiers cas, pour 10% de CO_2 l'accrochage de l'arc se situe 3 mm plus haut (à 9,5 mm de la cathode) et pour 20% de CO_2 il est situé à presque 6 mm (12,4 mm au-dessus de la cathode). De plus pour ces deux derniers cas le régime de transfert est globulaire (proche de la transition pour 10% de CO_2).

On constate que la température électronique [Cf. Figure VIII.24_a] est la plus élevée pour 20% de CO_2 sur une grande étendue, elle est supérieure à 12000 K de 1,5 à 2,5 mm de l'axe avec un maximum à 14000 K pour un rayon de 2 mm. Pour les autres gaz, des valeurs comparables ne sont atteintes que lors de pics moins étendus en rayon. Pour les trois cas avec du CO_2 la température est plus élevée, pour un rayon plus important, que pour l'argon seul. Pour ce qui est de la densité électronique [Cf. Figure VIII.24_b] les valeurs sont classées dans l'ordre inverse, c'est dans le cas du soudage sous 20% de CO_2 qu'elle est la plus faible ($1,0 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ contre $1,8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ pour l'argon et $1,6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ pour 5% de CO_2 à 2 mm de l'axe de la colonne).

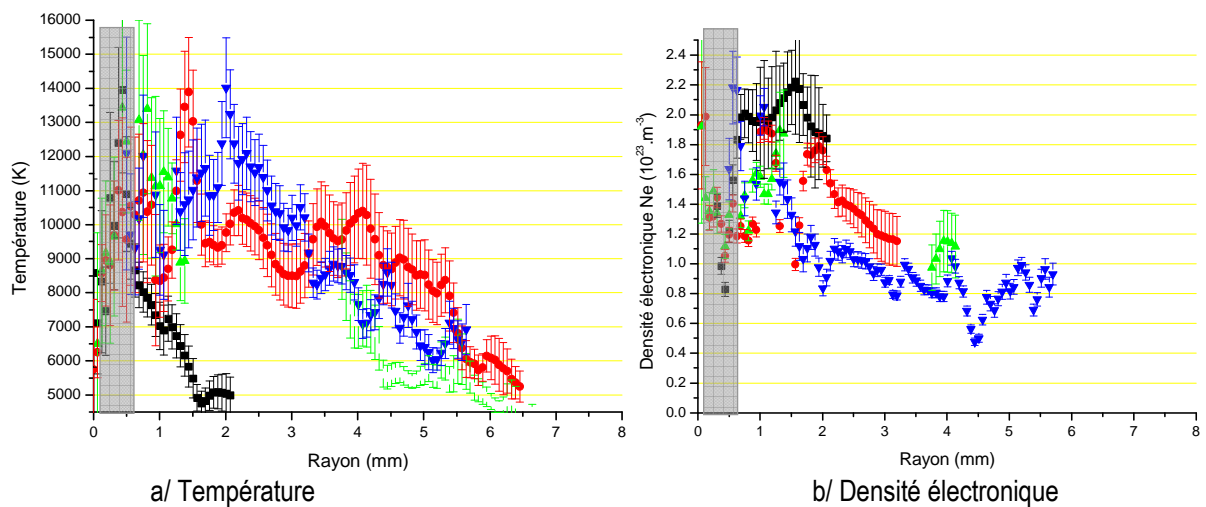


Figure VIII.24 : Diagnostic de l'arc pour $h = 6,5 \text{ mm} - I = 330 \text{ A}$.

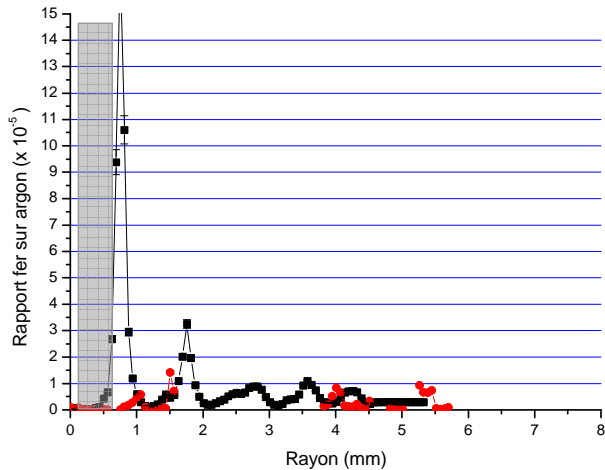
[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2 ; ▲ Ar + 10% CO_2 ; ▼ Ar + 20% CO_2]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

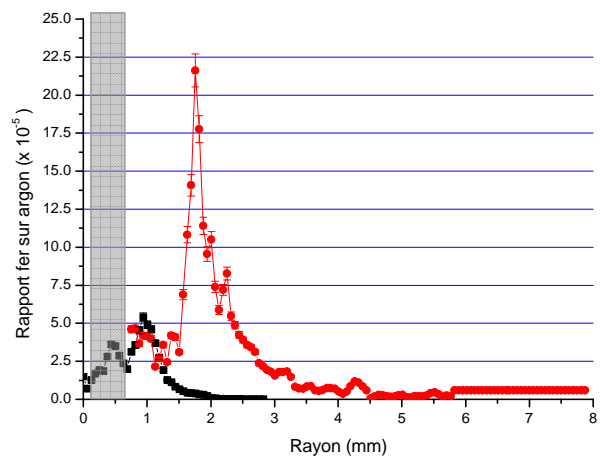
ii. Proportion de fer dans le plasma

Pour les différents gaz étudiés pour la température et la densité électronique, l'étude de l'évolution de la concentration en fer a été menée [Cf. Figure VIII.25]. L'observation du comportement de l'arc (augmentation des fumées) indique en effet que la concentration en fer augmente sensiblement avec l'ajout de CO₂ dans le gaz de protection.

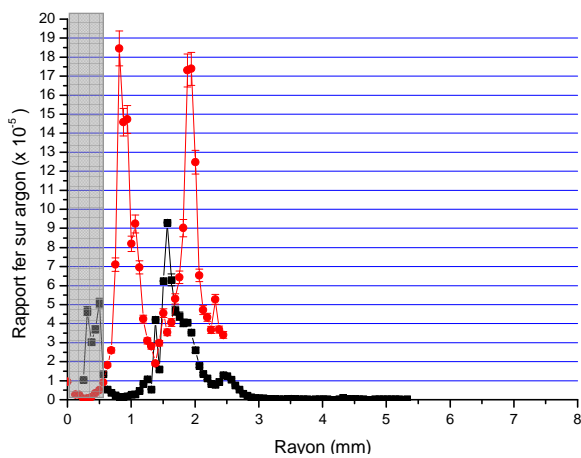
- Pour une hauteur de 3 mm au dessus de la cathode, on constate que la concentration en fer est peu différente au centre de la colonne. Par contre en périphérie plusieurs pics sont visibles. La concentration maximale reste cependant comparable à celle observée sous argon ($1,5 \cdot 10^{-4}$).



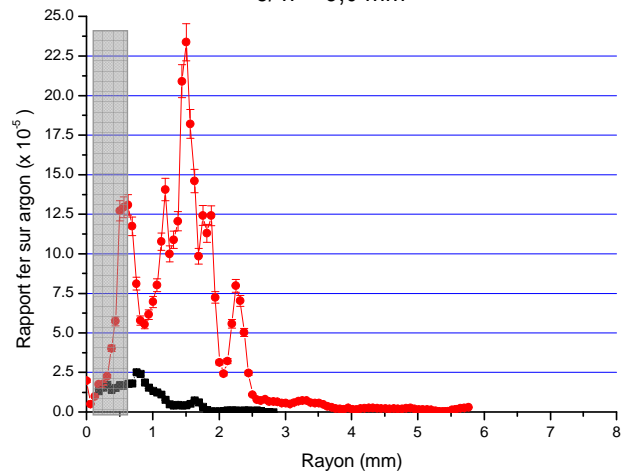
a/ $h \approx 3,0$ mm



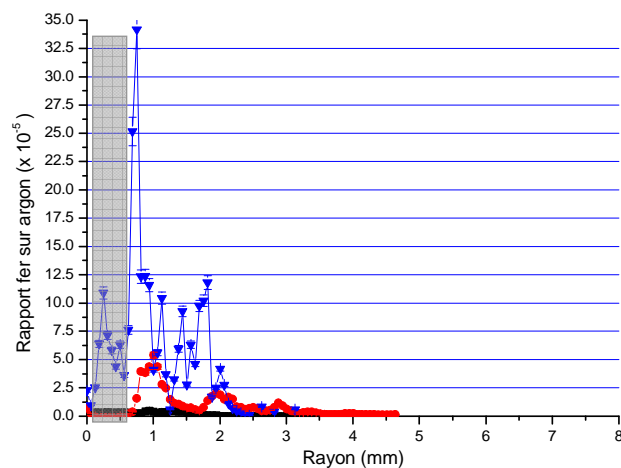
e/ $h \approx 5,0$ mm



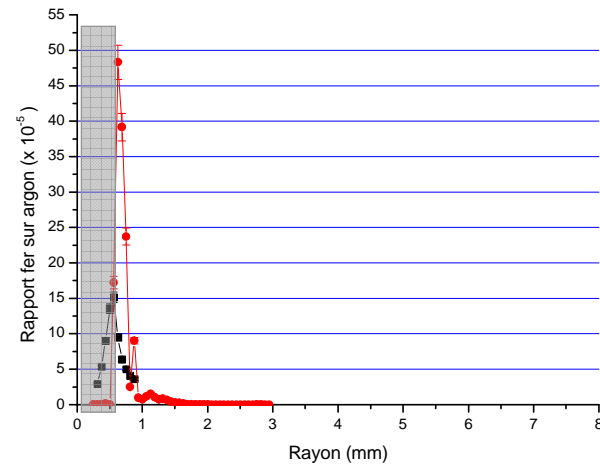
b/ $h \approx 3,5$ mm



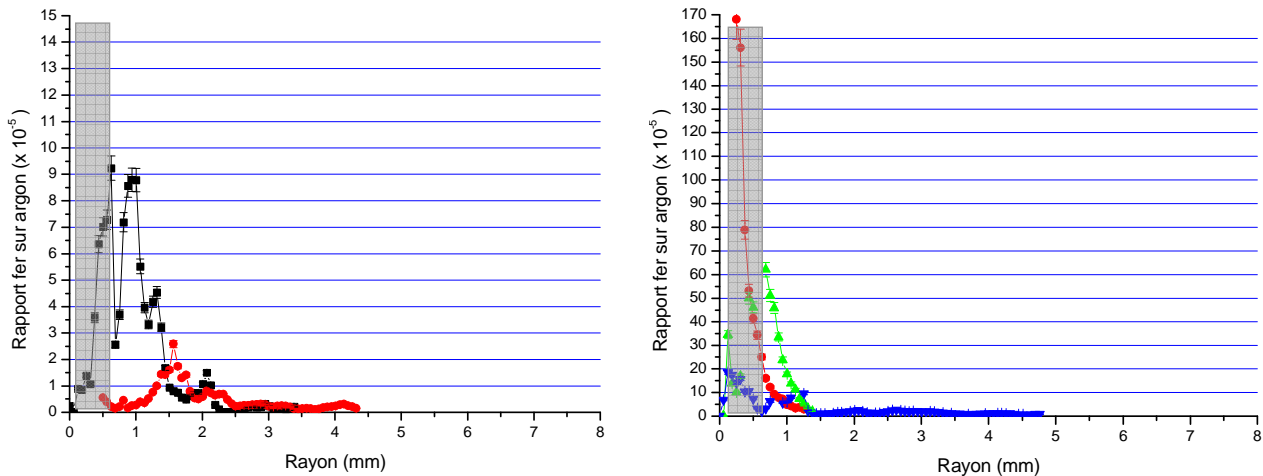
f/ $h \approx 5,5$ mm



c/ $h \approx 4,0$ mm



g/ $h \approx 6,0$ mm



$d/h \approx 4,5 \text{ mm}$ $h/h \approx 6,5 \text{ mm}$
 Figure VIII.25 : Répartition du rapport N_{Fe}/N_{Ar} – Mélange argon / CO_2 – $I = 330 \text{ A}$.
 [■ argon pur ; ● Ar + 5% CO_2 ; ▲ Ar + 10% CO_2 ; ▼ Ar + 20% CO_2]
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

- Pour une hauteur de 3,5 mm on retrouve le double pic de concentration maximale, avec une largeur plus importante que sous argon. La valeur maximale est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-4}$. On relève également une concentration plus importante en périphérie de l'arc.
- Pour une hauteur de 4 mm les mesures réalisées permettent de comparer trois cas différents. La concentration suit l'évolution du taux de CO_2 avec une valeur maximale de $3,5 \cdot 10^{-4}$ pour un taux de 20%. Le fer est réparti de manière plus homogène, jusqu'à un rayon de 2 mm la concentration est voisine de 10^{-4} .
- La concentration mesurée pour une hauteur intermédiaire (4,5 mm) est plus basse avec du CO_2 . Cependant le maximum est observé un peu plus loin de l'axe.
- L'écart est le plus important dans la zone haute de la colonne. Pour $h = 5 \text{ mm}$, la concentration maximale est cinq fois plus élevée dans le cas du soudage avec du CO_2 que sous argon seul. La concentration présente un pic assez large, avec un maximum plus loin de l'axe (2 mm) que dans le cas du soudage sous argon seul.
- Pour une hauteur de 5,5 mm, la concentration maximale est similaire à celle observée pour la hauteur inférieure ($2,5 \cdot 10^{-4}$), la zone de concentration maximale couvre toute la largeur de la zone centrale de l'arc.
- Au niveau l'anode, la concentration en fer est toujours plus élevée avec 5% de CO_2 , avec une valeur maximale de $5 \cdot 10^{-4}$ pour $h = 6 \text{ mm}$ [Cf. Figure VIII.25_g] La position du maximum est peu différente de celle observée dans le cas de l'argon.
- Pour une hauteur de 6,5 mm [Cf. Figure VIII.25_g], trois concentrations de CO_2 ont été étudiées. Dans le cas d'un taux de 5%, le maximum atteint $1,3 \cdot 10^{-3}$ au voisinage du centre de l'arc. Pour un taux de 10% la valeur est plus faible ($0,6 \cdot 10^{-3}$), mais dans ce cas l'anode située est nettement plus haut (à 9,5 mm de la cathode, soit 3 mm au-dessus de la ligne de mesure). Pour une distance comparable de l'anode la concentration est probablement encore plus élevée. Cette forte augmentation est compatible avec l'hypothèse présentée au chapitre VI concernant le transfert répulsif. On peut donc supposer que juste sous le point d'inflexion du métal la densité du plasma est suffisante pour créer un obstacle susceptible de faire rebondir la veine de métal liquide.

Le même raisonnement est valable pour un taux de 20% de CO_2 , le maximum est à $0,2 \cdot 10^{-3}$ ce qui est plus important que toutes les concentrations relevées sous argon ($0,15 \cdot 10^{-3}$). La distribution des vapeurs métalliques est plus homogène, aucun pic n'est visible. Ce résultat est en accord avec les observations de l'arc qui montrent sous 20% de CO_2 (régime globulaire) une absence de séparation nette entre une zone centrale plus lumineuse et la périphérie. En ce

qui concerne la concentration plus faible en fer, il faut tenir compte de la distance encore plus importante (environ 6 mm) de l'anode par rapport au point de mesure.

3.4. Etude d'un autre gaz moléculaire : cas de l'azote N₂

Un essai a été réalisé avec un mélange argon + 5% d'azote à une hauteur $h = 4,5$ mm au-dessus de la cathode, pour comparer l'effet de l'ajout d'un gaz moléculaire, ne contenant pas d'oxygène, aux fonctionnements sous argon pur et avec 5% de CO₂.

Dans tous les cas, le régime de pulvérisation axial est établi, avec des hauteurs d'arc comparables : 7,7 mm pour l'argon seul, environ 8 mm pour le mélange argon + 5% de CO₂, et 8,1 mm pour l'argon avec 5% de N₂. Néanmoins, l'arc sous mélange azoté semble plus stable et génère beaucoup moins de fumées que celui sous concentration équivalente de CO₂.

Si les densités électroniques restent comparables, en revanche la température électronique [Cf. Figure VIII.26_a] semble plus élevée et homogène dans le cœur de la colonne sous mélange argon/azote qu'en fonctionnement sous argon pur ou avec 5% de CO₂, et surtout son maximum est atteint sur l'axe avec une valeur de l'ordre de 11500 K : cet effet est probablement lié à la conductivité thermique plus importante de l'azote par rapport à l'argon qui favorise le transfert d'énergie.

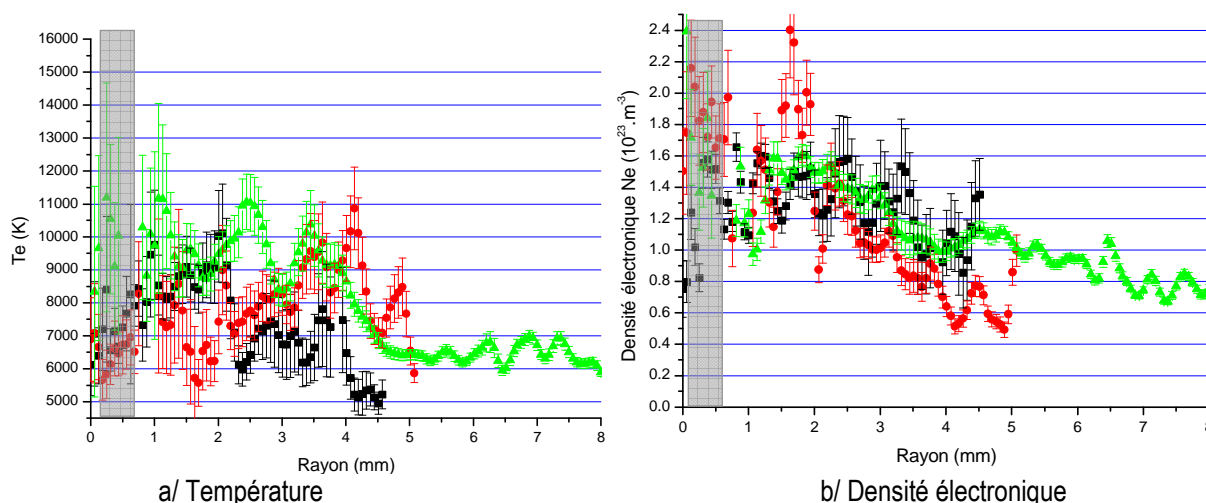


Figure VIII.26 : Diagnostic de l'arc pour $h = 4,5$ mm – $I = 330$ A.

[■ argon pur ; ● Ar + 5% CO₂ ; ▲ Ar + 5% N₂]

[Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9$ m/mn ; $D_g = 20$ l/mn]

La proportion de fer dans le plasma présente un maximum sur l'axe [Cf. Figure VIII.27], mais également à environ 1 mm de l'axe. Par ailleurs, la colonne apparaît comme légèrement plus constrictée que sous mélange Ar/CO₂

Ces résultats sont peut être à rapprocher de la mise en évidence, lors d'essais réalisés au CTAS, de gains de performances sur le cordon de soudage (augmentation de 10% de la pénétration) en ajoutant 100 ppm d'azote à l'argon utilisé comme gaz de protection : la constriction de l'arc permettant une meilleure canalisation de l'énergie disponible vers la pièce à souder, et l'augmentation de température améliorant d'autant la fusion de la pièce. Néanmoins, dans le cas des essais au CTAS, les faibles quantités d'azote engagées peuvent difficilement expliquer seules le gain de pénétration obtenu.

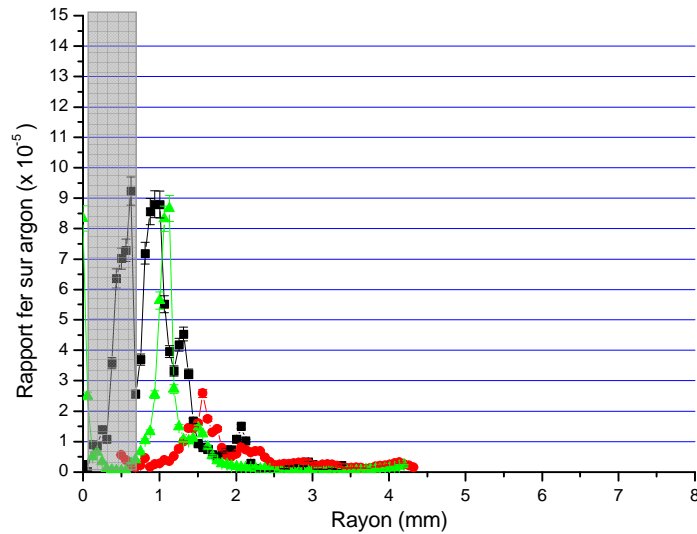


Figure VIII.27 : Répartition du rapport $N_{Fe}/N_{Ar} - I = 330 \text{ A}$, $h = 4,5 \text{ mm}$.
 [(■) argon, (●) 5% CO_2 et (▲) 5% N_2]
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

3.5. Influence de la composition du fil

L'influence du fil sur le comportement du plasma, et notamment la présence d'éléments aisément ionisables tels que du titane ou des alcalins, a été étudiée à une hauteur $h = 4,5 \text{ mm}$ au-dessus de la cathode, en comparant respectivement le fil massif AS 42 (0,3% Ti) et le fil fourré G003 (1% Ti), puis le fil fourré Mégafil (0,18% Li + 0,48% Na + 0,012% Li) au fil massif 70 S de référence. Le courant d'arc est fixé à 330 A.

i. Fils contenant du titane

La comparaison se fait en fonctionnement sous Ar + 5% de CO_2 : ce mélange gazeux a été choisi pour l'étude, de telle sorte que les longueurs d'arc soit comparables : $\approx 8,0 \text{ mm}$ pour le 70 S ; 8,2 mm pour l'AS 42 ; et 7,0 mm pour le G003. Le fonctionnement se fait alors en régime de pulvérisation axiale.

Les profils de température sont assez similaires dans tous les cas, si ce n'est en périphérie où le fil massif contenant du titane semble induire une hausse de la température [Cf. Figure VIII.28]. La chute de température au voisinage de l'axe reste bien visible. L'augmentation de vitesse de fusion constatée pour le fils fourré G003 n'est donc certainement due qu'à la structure lacunaire du fil et non à une modification du chauffage par l'arc.

Pour ce qui est de la densité électronique, les deux fils massifs (AS 42 et 70 S) présentent un comportement similaire avec une densité électronique maximale de l'ordre de $1,8 \text{ à } 2,0 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ sur l'axe. Pour le fil fourré G003, par contre, la densité maximale semble passer par un maximum hors axe ($\approx 1,4 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ à $\approx 2 \text{ mm}$), et est de l'ordre de 10^{23} m^{-3} au centre de la colonne.

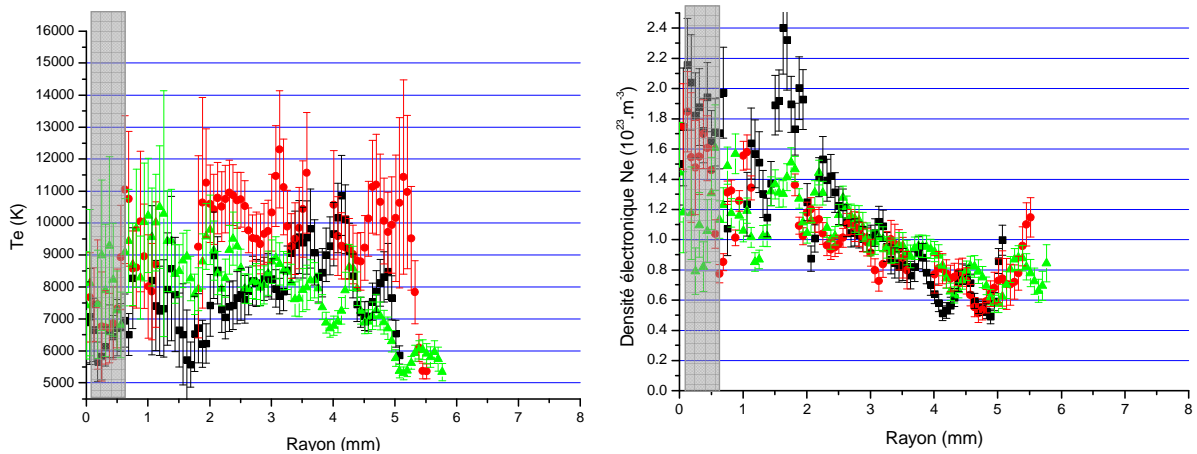


Figure VIII.28 : Diagnostic de l'arc pour $h = 4,5$ mm

[■ 70 S ; ● AS 42 ; ▲ G003]

[Conditions expérimentales : $I = 330$ A – Ar + 5% CO_2 ; $V_{fil} = 9$ m/mn (11,4 m/mn pour G003) ; $D_g = 20$ l/mn]

Pour les fils contenant du titane [Cf. Figure VIII.29], la proportion de fer dans le plasma est nettement supérieure à celle obtenue avec le fil de référence 70 S : elle atteint environ 2.10^{-4} à environ 1 mm de l'axe, indiquant une légère constriction de la colonne.

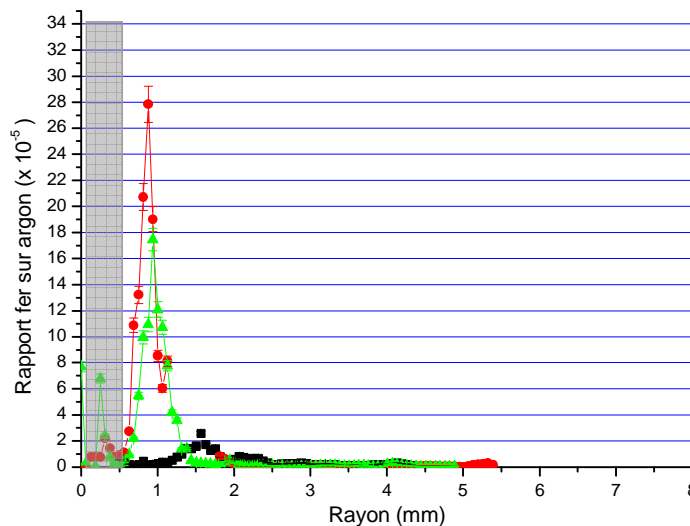


Figure VIII.29 : Répartition du rapport N_{Fe}/N_{Ar} pour $h = 4,5$ mm, Fils 70 S, ■ ; AS 42, ● et G003, ▲

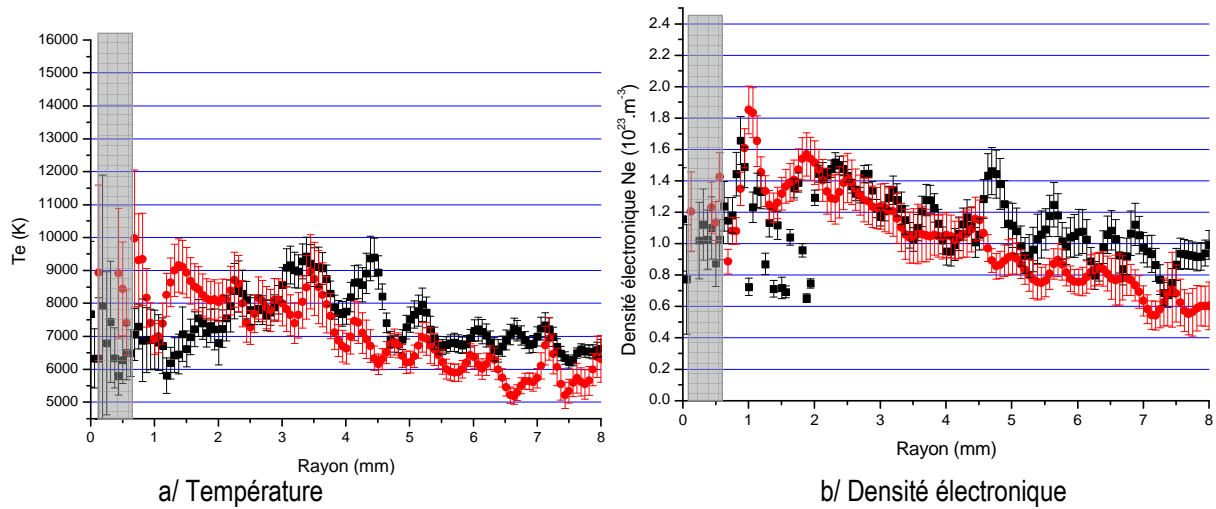
[Conditions expérimentales : Ar + 5% CO_2 , $I = 330$ A, $V_{fil} = 9$ m/mn (11,4 m/mn pour G003) ; $D_g = 20$ l/mn]

ii. Fils contenant des alcalins : cas du Mégafil

Le Mégafil est caractérisé par des hauteurs d'arc plus faibles que le 70 S, et un régime de transfert pouvant être très différent (pulvérisation multi-gouttes). De façon à travailler en régime de pulvérisation axiale dans les deux cas, la comparaison a été faite en fonctionnement sous argon pur, et à une même distance $h = 3$ mm de la cathode, et pour des longueurs d'arc de l'ordre de 7,7 mm pour le 70 S, et de 4,4 mm pour le Mégafil.

Le profil de température avec le Mégafil est relativement homogène jusqu'à environ $r = 3$ mm, et la chute de température sur l'axe, si elle existe, est très peu marquée, en comparaison du fonctionnement avec le 70 S [Cf. Figure VIII.30]. La fusion plus importante observée avec le fil fourré contenant des alcalins est donc probablement due à l'effet métallurgique de ces éléments (abaissement de la température de fusion du métal) plutôt qu'une augmentation de la température de l'arc.

Les profils de densités électroniques sont tout à fait similaires pour les deux fils, avec un maximum d'environ $1,5 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ à 1 mm du centre de la colonne : il ne semble donc pas que, vu les faibles quantités mises en jeu, il y ait ionisation supplémentaire due à la présence des alcalins dans le milieu plasmagène...



a/ Température

b/ Densité électronique

Figure VIII.30 : Diagnostic de l'arc pour $h = 3 \text{ mm} - I = 330 \text{ A} - \text{argon pur}$

[■ 70 S ; ● Mégafil]

[Conditions expérimentales : argon pur, $I = 330 \text{ A}$, $70 \text{ S} : V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$ (70 S), $11,4 \text{ m/mn}$ (Mégafil) ; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

Par contre, il apparaît clairement que dans le cas du Mégafil en fonctionnement sous argon pur, la proportion de fer dans le milieu plasmagène est maximale au centre de la colonne, et toujours nettement supérieure à celle obtenue avec le fil de référence [Cf. Figure VIII.31]. A nouveau, la constriction de la colonne observée par cinématographie rapide, est visible sur la répartition des vapeurs métalliques dans le plasma.

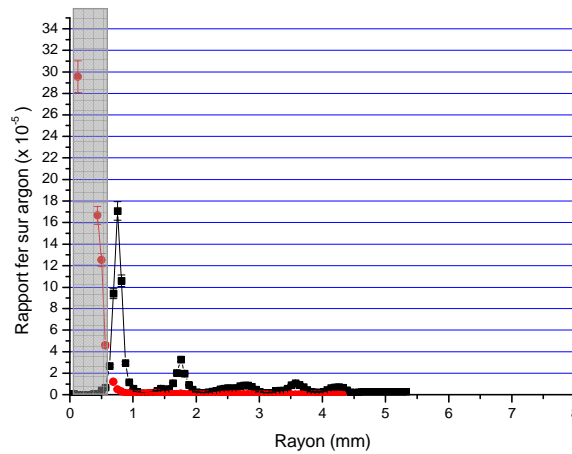


Figure VIII.31 : Répartition du rapport N_{Fe}/N_{Ar} pour $h = 3 \text{ mm}$

[■ 70 S ; ● Mégafil]

[Conditions expérimentales : argon pur, $I = 330 \text{ A}$, $V_{fil} = 9 \text{ m/mn}$ (70 S) / $11,4 \text{ m/mn}$ (Mégafil) ; $D_g = 20 \text{ l/mn}$]

5. CONCLUSION

L'étude spectroscopique de l'arc permet de caractériser les paramètres de fonctionnement lors du soudage sous argon seul. Une série de mesures réalisées à 330 A sous divers gaz de mélange (argon pur, Ar + 5% CO₂, Ar + 20% CO₂) et avec le fil de référence 70 S, a permis de cartographier l'évolution de la température dans une large partie de l'arc, de 2 à 6,5 mm au-dessus de la cathode et à une distance maximale de 8 mm de l'axe de la colonne. La valeur maximale de la température (12000 à 13000 K) est atteinte hors de l'axe, avec une valeur au centre de l'ordre de 6000 à 7000 K. Au voisinage immédiat de l'anode, la veine de métal liquide (diamètre de l'ordre de 0,36 mm) est présente au centre de la colonne de plasma

Ces valeurs, qui sont en accord avec celles déjà mesurées par S.Zielinska [Cf. Figure VIII.32, tirée de 167] pour les hauteurs de 3, 4,5 et 6 mm, sont par contre nettement inférieures à celles obtenus dans les différentes modélisations publiées dans la littérature [38, 53].

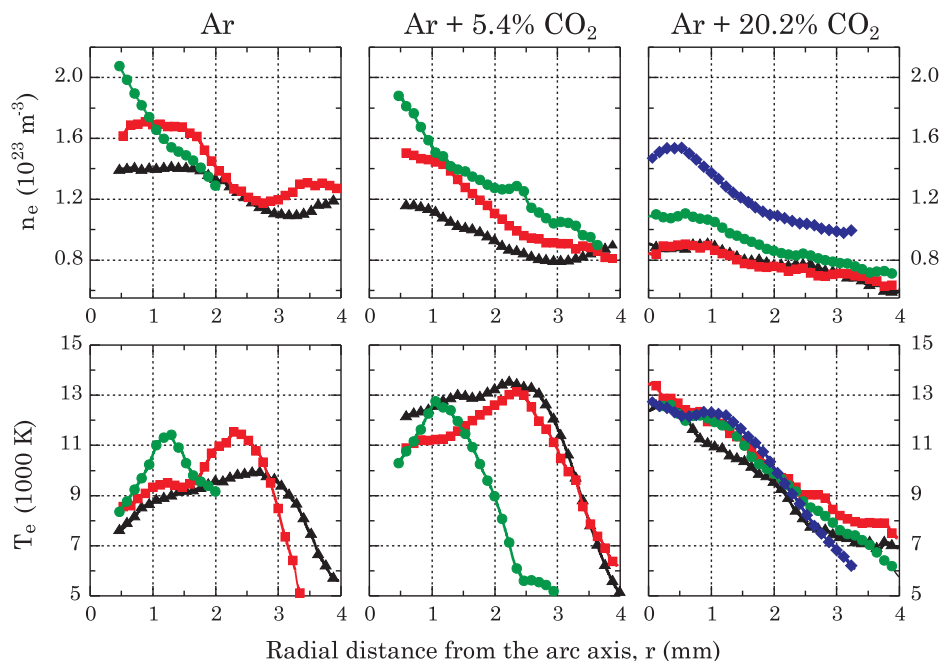


Figure VIII.32 : Diagnostic du plasma de soudage pour différents type de gaz de protection : argon pur, argon + 5% CO₂ et argon + 20% CO₂

[▲ $h = 4,5$ mm ; ■ $h = 6,0$ mm ; ● $h = 7,5$ mm ; ◆ sous l'anode]
 [Conditions expérimentales : Fil massif 70 S ; $I = 326$ A ; $D_g = 20$ l/mn]

En particulier, dans le cas de la pulvérisation axiale (argon seul et avec 5% de CO₂), il existe une chute caractéristique de température au centre de l'arc, qui n'apparaît plus clairement en régime globulaire (10% et plus particulièrement 20% de CO₂) : pour une hauteur de 4 mm, la température est maximale au centre de la colonne ; pour une hauteur de 6,5 mm, la différence est peu marquée entre le maximum (14000 K) et la valeur relevée au centre de la colonne (11000 K). Cette chute de la température électronique est certainement due à l'ensemencement de la colonne en vapeurs métalliques au cours du transfert de la goutte le long de l'axe de l'arc. Il n'apparaît plus en régime globulaire du fait de la dispersion des trajets suivis par le métal liquide après son détachement.

Dans le cas général, la température est plus élevée lorsque du CO₂ est ajouté au gaz de protection. La densité électronique suit par contre l'évolution inverse : elle diminue avec l'augmentation du taux de CO₂, en particulier à une certaine distance (au-delà de 3 mm) de l'axe de la colonne.

La proportion de fer dans le plasma augmente fortement lorsque du CO₂ est ajouté au gaz de protection, pour une distance comparable de l'anode. En régime globulaire (argon avec 10 et 20% de CO₂), les vapeurs métalliques sont réparties de manière plus homogène ce qui est en accord avec l'absence de séparation entre les zones centrale et périphérique, visibles par cinématographie rapide avec filtre interférentiel. Au contraire, en régime de pulvérisation axiale, la limite entre les deux zones correspond au maximum de température mesuré dans l'arc pour la couche considérée, mais aussi au maximum de concentration des atomes de fer.

L'utilisation de ces différents résultats devait permettre de remonter aux propriétés de transport du plasma : conductivités électrique et thermique... En particulier, la viscosité d'un plasma Ar ou Ar/Fe/CO₂ passe par un maximum au voisinage de 10000 K, selon les proportions relatives des divers éléments [Cf. Section IV.4, page 69]. Ainsi,

- En argon pur, la viscosité du plasma est quasiment identique en tout point de la colonne: le métal liquide libéré du fil-anode, injecté dans la colonne, peut la traverser sans obstacle, et est projeté sur la cathode.
- Lors de l'ajout de CO₂, dans le gaz de protection, d'une part la viscosité sur l'axe décroît lorsque la goutte s'éloigne de l'anode, et par ailleurs, il pourrait exister un maximum hors axe de cette même viscosité qui 'emprisonne' le métal liquide, limitant son éjection vers la périphérie de la colonne.
- Sous fort taux de CO₂, la température sur l'axe de la colonne est très supérieure à 10000 K : il existe alors sous l'anode un fort gradient de viscosité, et le métal liquide est maintenu 'sur' la colonne de plasma, renforçant l'effet d'attachement de la goutte sur l'électrode lié à la présence de la gangue. Lors de son détachement, le métal liquide ne peut pénétrer facilement dans le cœur du plasma, et est éjecté latéralement.

L'utilisation d'un autre gaz moléculaire, l'azote, ajouté en proportion équivalente au CO₂ (5%), se traduit par une température de plasma plus élevée sans minimum sur l'axe de la colonne, mais avec des densités électroniques et répartitions en fer relativement similaires à celles observées avec utilisation du CO₂. Néanmoins, le plasma est certainement plus chaud, alors que la colonne d'arc semble être légèrement constrictée.

La présence de titane dans le fil (fils AS 42 et G003) entraîne une légère élévation de température et de la concentration en fer dans le plasma alors que la densité électronique ne varie pas, tandis que l'utilisation de fondants (cas des alcalins dans le Mégafil) génère une augmentation importante de la concentration en fer dans le plasma sans répercussion sur les profils de température ou de densité électronique.

IX - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude de l'arc de soudage MIG-MAG qui a été réalisée permet d'établir les conclusions suivantes :

- L'utilisation d'un filtre interférentiel permet de visualiser dans de bonnes conditions simultanément le métal liquide à l'extrémité de l'électrode et l'arc entourant celle-ci. A partir des enregistrements réalisés, il a ainsi été possible de caractériser la géométrie de l'électrode consommable (anode) au cours du fonctionnement. Les caractéristiques du régime globulaire et de la pulvérisation axiale peuvent être distinguées de la manière suivante :
 - La forme de l'électrode évolue d'une veine de métal liquide effilée de laquelle se détachent de petites gouttes (0,6 mm de diamètre) à fréquence élevée (supérieure à 600 Hz) en pulvérisation axiale vers une goutte de diamètre important (1,5 à 2 mm) se formant et se détachant à faible fréquence (de l'ordre de 100 Hz) en régime globulaire.
 - La surface globale en contact avec le plasma ne varie pratiquement pas entre les deux régimes. Par contre l'interface avec la zone riche en vapeurs métalliques augmente lorsque le transfert de métal dans l'arc évolue vers un régime globulaire. Ces résultats sont importants pour caractériser le flux de courant sortant de l'électrode.
- Une estimation du poids des gouttes formées (toujours très faible) et de la force liée à la tension de surface (comparable en module à la force de Lorentz) a pu être réalisée pour diverses conditions de soudage, notamment en fonction du type de fil-anode utilisé.
- Les caractéristiques des différents régimes sont données sur le Tableau IX.1

Description des régimes	Pulvérisation axiale	Régime globulaire
Forme de l'arc	Cône	Cloche
Fréquence des gouttes	$f > 300$ Hz	$f < 300$ Hz
Poids des gouttes	6 μ N	90 μ N
Force de Lorentz	4 à 7 mN	± 2 mN
Tension de surface	- 5 mN	-2 à -6 mN
Vapeurs métalliques	Zone centrale	Homogènes
Gangue	Absente	5 à 50 μ m : oxydes
Précipités	Peu nombreux	Nombreux
Température électronique	Maximum hors axe à 12500 K (argon)	Maximum à 14000 K, faible diminution sur l'axe (Ar + 20% CO ₂)
Densité électronique	Maximum hors axe à 2,2.10 ²³ m ⁻³ (argon)	Maximum à 1,8.10 ²³ m ⁻³ , faible diminution sur l'axe (Ar + 20% CO ₂)

Tableau IX.1 : Caractéristiques du régime globulaire et de la pulvérisation axiale, à 330 A

- L'étude de l'évolution de la tension, corrélée avec celle de la longueur d'arc, a permis de vérifier le lien entre ces deux paramètres, pour les différentes conditions de soudage utilisées. En particulier, lors de l'utilisation d'un fil massif 70 S, nous avons pu montrer l'existence d'un abaissement de la tension d'arc dès l'ajout dans le gaz d'une très faible proportion de dioxyde de carbone, puis son augmentation progressive avec le taux de CO₂, la transition pulvérisation axiale-globulaire étant caractérisée par le passage par la valeur de la tension obtenue sous argon pur. Cet effet n'a pas été observé avec les autres fils massifs ou fourrés utilisés, pour lesquels le régime de soudage restait de type pulvérisation axiale dans toute la gamme d'étude.
- Les résultats, établis pour les fils pleins et les fils fourrés, ont servi de base à l'étude des performances de différentes compositions du fil-électrodes. Ils ont permis de mettre en évidence l'effet du lithium et du potassium qui permettent de souder avec un gaz

majoritairement composé de CO₂ pour un courant modéré.

- De nombreux abaques donnant la position de la transition entre le régime globulaire et la pulvérisation axiale en fonction du courant et du taux de CO₂, ont été établis. Ces résultats correspondent à un des principaux objectifs de ce travail de thèse qui consistait à déterminer une composition de fil permettant d'obtenir le régime de pulvérisation axiale pour un taux de CO₂ supérieur à 50%. Pour trois des fils étudiés ce taux est dépassé, pour un courant de 330 ampères (pour les fils G011 et G012) et même dès 300 ampères pour le fil G010 contenant un mélange d'alcalins Li et K. Pour ce dernier la pulvérisation axiale a été observée pour un taux de CO₂ de plus de 60% pour le courant le plus élevé utilisé (410 ampères). Le Tableau IX.2 résume les résultats obtenus pour les différents éléments étudiés.

Élément étudié	Si (diminution)	Ti (ajout)	Zr, La (ajout)	Li, Na, K (ajout)
Fils	AS 26, AS 35, G002, G004	AS 42, S2MoTi, G003	G005, G006	G007, G008, G009, G010, G011, G012, Mégafil
Effet	Viscosité, Résistance électrique	Résistance électrique	Résistance électrique	Viscosité
Résultat	Amélioration de la transition	Pas d'amélioration sensible	Amélioration de la transition	Amélioration de la transition
Conclusion	Pas applicable car Si est nécessaire	Pas applicable car Ti se vaporise	Gangue plus conductrice mais gain modéré	Soudage à plus de 50% de CO ₂ pour G010 et G011

Tableau IX.2 : Récapitulatif des différents éléments étudiés, par rapport à la composition du 70 S

- L'analyse de la structure microscopique de l'anode prélevée après extinction de l'arc, a permis de préciser les phénomènes limitant l'établissement du régime de pulvérisation axiale sous forte concentration de CO₂ dans le gaz de protection.
 - L'étude comparative d'un fil fourré (G002) et d'un fil massif (AS 26) de composition voisine montre que les comportements en soudage et les caractéristiques microstructurales observés sont similaires dans les deux types de fils. Ainsi, ces expériences valident l'utilisation du fil fourré en substitution du fil plein, aussi bien en terme de régimes de soudages, qu'en terme de phénomènes physico-chimiques, notamment d'interaction liquide - atmosphère de travail.
 - Pour tous les fils étudiés (fils fourrés et fils massifs), l'évolution des comportements est comparable à celle observée pour le fil de référence 70 S : une gangue d'oxydes est présente dans le cas du régime globulaire, son épaisseur croît avec le taux de CO₂ et décroît avec le courant. Les oxydes précipitent également sous forme de précipités répartis dans la matrice. Il y a donc une relation directe entre la formation de ces oxydes et la présence de CO₂ dans le gaz de protection, conformément aux prévisions thermodynamiques
 - La modification de la composition du fil par retrait d'un élément (le silicium par exemple) ou ajout de métaux choisis (Ti, Zr, La pour les propriétés conductrices de leurs oxydes, et K, Li, Na : pour leur propriétés de fondants) modifie considérablement les propriétés physico-chimiques du système telles que les points de fusion, les tensions de surfaces, la nature des phases en équilibre.
 - Que ce soit pour les fils massifs ou les fils fourrés, on constate que les éléments métalliques supplémentaires par rapport au fil de référence sont effectivement présents dans la gangue ou les précipités.
 - L'effet de la gangue d'oxydes entourant la goutte est renforcé par la présence du silicium (qui reste nécessaire à l'obtention d'un cordon de bonne qualité), mais peut être atténué par l'emploi des éléments alcalins. Par rapport aux autres fils étudiés, tout se passe alors comme

si la gangue était maintenue à l'intérieur du fil, n'opposant pas de contrainte d'accrochage au plasma.

→ L'interprétation du passage en régime globulaire par la formation d'une gangue d'oxydes empêchant le détachement des fines gouttes représente une alternative innovante par rapport à l'explication couramment admise basée uniquement sur l'effet des forces électromagnétiques, et évoquée au chapitre précédent. Cependant les deux approches ne sont pas incompatibles puisque l'aspect isolant de la gangue peut expliquer la modification de la géométrie des lignes de courant et donc le changement de signe des forces électromagnétiques. Les résultats obtenus montrent que de bonnes performances peuvent également être obtenues avec des oxydes à haut point de fusion (zirconium notamment). Les améliorations plus significatives ont donc été obtenues en agissant sur les paramètres physico-chimiques (température de fusion, viscosité) de l'électrode, liés directement à la formation et aux propriétés de la gangue.

- Le diagnostic spectroscopique complet du plasma a permis de mettre en évidence l'évolution de la température et de la densité électronique dans la colonne d'arc, pour différentes compositions du gaz de protection. L'existence d'un maximum de température hors-axe en régime de pulvérisation axiale a notamment été précisée en fonction du rayon pour différentes positions entre la cathode et l'anode.

Les premières applications de ces résultats à l'estimation des propriétés de transport du plasma de soudage utilisant les données de T.Murphy [Cf. section IV.4] semblent montrer que, si en pulvérisation axiale, la viscosité du plasma peut jouer un rôle de canalisation des gouttes de métal liquide de l'anode vers la cathode, au contraire, en régime globulaire, elle pourrait renforcer l'attachement de la goutte sur l'électrode et, en empêchant le métal liquide de pénétrer dans le plasma, expliquer l'importance des projections latérales.

Cette analyse doit être confirmée en utilisant les valeurs correctes de la viscosité dans le plasma, prenant en compte la température mais également la proportion locale de Fe/Ar. Connaissant désormais les proportions de fer dans le milieu plasmagène, nous avons contacté T.Murphy, du CSIRO (Australie), pour lui proposer de calculer la composition et les propriétés thermodynamiques d'un plasma Ar-CO₂-Fe dans une large gamme de compositions. Nous comptons sur ces résultats pour finaliser l'étude entreprise.

- L'ensemble de ces résultats pourra servir de base à la réalisation d'un modèle numérique de l'arc prenant en compte l'influence des vapeurs métalliques, dont la proportion dans l'arc a également été estimée. Les caractéristiques de l'arc comme la chute de température au centre de la colonne pourront ainsi être définies avec plus de précision. De même, les mesures des paramètres géométriques de l'électrode permettront d'inclure dans le modèle le comportement de l'anode dans les différents régimes de soudage.

L'ensemble des données recueillies a permis de mieux caractériser le processus de soudage MIG-MAG. Les phénomènes qui empêchent, sous utilisation de CO₂, d'atteindre le régime de pulvérisation axiale, semblent désormais bien appréhendés, et des solutions innovantes ont été proposées pour obtenir le transfert par pulvérisation axiale au-delà des limites existantes. Elles pourront servir de base à la réalisation d'un produit exploitable..

Il semble intéressant de prolonger ce travail par l'étude de l'effet des caractéristiques du plasma sur le régime de soudage, notamment en tentant de découpler d'éventuels effets du carbone et de l'oxygène sur le procédé de soudage (utilisation d'oxygène pur, ou de gaz tels que le butane ou le propane), et/ou de modifier localement les propriétés de transport du milieu plasmagène.

Par ailleurs, nos divers résultats semblent indiquer que la majorité du courant d'arc passe par la zone 'brillante' du plasma observé sous filtre interférentiel. Dans ces conditions, il serait intéressant de tenter mieux focaliser la colonne de plasma de façon à limiter son extension et améliorer le procédé en terme de transfert d'énergie vers la pièce à souder et de taux de pénétration.

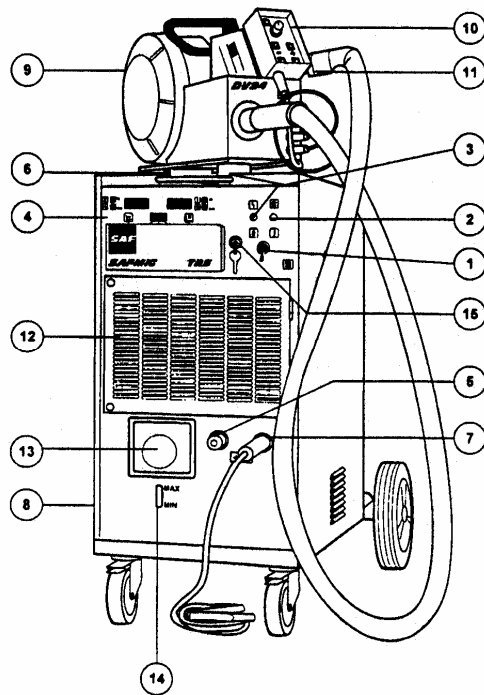
X - ANNEXES

ANNEXE A : REFERENCES SPECTROSCOPIQUES DES RAIES UTILISEES POUR LE DIAGNOSTIC

Longueur d'onde (Ritz) dans l'air (Å)	Fe I 5 383.369 Å	Fe I 5 393.167 Å	Fe I 5 397.127 Å	Ar I 6 965.430 Å
Intensité relative	60	40	300	10000
A_{ki} (s ⁻¹)	5,6.10 ⁰⁷	3,1.10 ⁰⁶	2,59.10 ⁰⁵	6,39.10 ⁰⁶
Précision	C+	C+	B+	C
E_i (eV)	4,3124697	3,2409687	0,9146016	11,5483537
E_k (eV)	6,614926	5,5392422	3,2111889	13,3278562
Termes	z 5G° e 5H	z 5D° e 5D	a 5F z 5D°	2[3/2]° 2[1/2]
Configurations	3p ⁶ 3d ⁷ (4F)4p 3p ⁶ 3d ⁷ (4F)4d	3p ⁶ 3d ⁶ (5D)4s4p(3P°) 3p ⁶ 3d ⁶ (5D)4s (6D)5s	3p ⁶ 3d ⁷ (4F)4s 3p ⁶ 3d ⁶ (5D)4s4p(3P°)	3s ² 3p ⁵ (2P°3/2)4s 3s ² 3p ⁵ (2P°1/2)4p
J_i	5	3	4	2
J_k	6	4	4	1
g_i	11	7	9	5
g_k	13	9	9	3

Données spectroscopiques complètes des raies les plus utilisées [134]

ANNEXE B : LE POSTE DE SOUDAGE SAFMIG 480 TRS



1) Schéma

<p>Générateur (8 sur le schéma)</p> <p>Alimentation primaire Intensité maximale absorbée Intensité de soudage Facteur de marche MIG/ARC Tension à vide Tension de soudage Fréquence de pulsation Modes de réglage Cycles de soudage</p>	<p>SAFMIG 480 TRS</p> <p>230 / 400 / 415 / 440 V sous 50 Hz 60 / 35 / 32 / 31 / 28 A 20 à 450 A 450A à 100% 70 V 14 à 44 V 10 à 500 Hz Synergie mono-bouton ou non 2t, 4t, Point, "Hot start"</p>
<p>Dévidoir (9 sur le schéma)</p> <p>Domaine d'emploi Platine de dévidage Vitesse de dévidage Régulation de vitesse fil</p>	<p>DV 24</p> <p>Fils de diamètre 0.8 à 1.6 mm 4 gallets 1 à 20 m/mn ± 1%</p>
<p>Torche (11 sur le schéma)</p> <p>Câble composite I_s au facteur de marche 100% argon I_s au facteur de marche 100% ATAL Tube contact</p>	<p>PROMIG 450</p> <p>3 m 400 A 450 A Pincé</p>
<p>Com. à distance (10 sur le schéma)</p> <p>Longueur de câble Type de réglage Changement de programme</p>	<p>CDM6</p> <p>5 m Clavier Commutateur 6 positions</p>

2) Caractéristiques techniques

MIG-MAG Conventionnel Plage de courant Plage de tension Plage de Vitesse fil	20 - 320/450A 10 - 44 V 1 - 20 m/mn
MIG-MAG Pulsé Plage de courant Plage de tension Plage de Vitesse fil	20 - 320/350 A 20 - 40V 1 - 20 m/mn
MIG-MAG Short-Arc Plus Plage de courant Plage de Vitesse fil Plage de Hauteur d'arc <i>(Mode Synergie - Fil 16/10° acier)</i>	20 - 320/360 A 1 - 20 m/mn -4 - +4 m/mn

3) Domaines d'utilisation en MIG-MAG

Vitesse de dévidage du fil	$\pm 2.0\%$	-	Résolution ± 1 digit
Courant moyen de soudage	± 2.0 A	-	Résolution ± 2 digits
Tension moyenne de soudage	± 0.2 V	-	Résolution ± 1 digits

4) Précision des afficheurs du poste de soudure SAFMIG

ANNEXE C : CARACTERISTIQUES DES DEBITMETRES MASSIQUES



Débitmètre massique

Fabricant	BROOKS INSTRUMENT	
Type	5850S	
Numéro de série	T10049/015	T10049/016
Nature du fluide	N ₂	Ar
Fluide utilisé (étalonnage)	Air	
Fluide utilisé (expériences)	CO ₂	Ar
Etendue de mesure	0 – 20 l/min (à 0° et 1013.25 mbar)	
Signal de sortie	0 – 15 Volts	
Signal de consigne	0 – 15 Volts	
Tension d'alimentation	+15/-15 Volts	
Stabilité	< ±0.5% par an	
Influence de température	0.015%/°C	
Température	0 – 70°C	
Réponse	1 sec.	

ANNEXE D : FEUILLE DE CALCUL POUR LE CONTROLE DES DEBITMETRES

Brooks order number	T10049/015		T10049/016
Device id number	1004915		1004916
Tag number	10049015		10049016
Max. flow [l/min]	20		20
Proces gas	N₂	CO₂	Ar
Density [kg/m ³]	1.251	1.977	1.784
Gas factor	1	0.773	1.395
Conversion factor	1.002	0.775	1.398
Calibration gas	Air		
Gas factor	0.998		
Density [kg/m ³]	1.293		
Setpoint in %	0.0000		72.0000
Setpoint [l/min]	0.0000		14.4000
Setpoint [l/min]	0.0000	0.0000	20.1283
Analog setpoint source	ctrl-a		ctrl-b
Comm. setpoint source	ctrl-w		ctrl-d
Set refreshrate	ctrl-e		ctrl-f
Zero the DMFC	ctrl-g		ctrl-h
Valve value	13738		62500
Analog output voltage	0		0
Flow [l/min] Air	0		0.050156
Flow [%] Air	0		0.247536
Air+Air [l/min]	0.050156		
Flow [l/min] N ₂ , CO ₂ , Ar	0	0	0.0701
N₂+Ar [l/min]	0.070107836		
CO₂+Ar [l/min]	0.070107836		
N₂ [%]	0		
CO₂ [%]	0		
Temperature [°C]	22.552795		30.496735
% CO ₂ / Débit total	0.0000		20.1283

Copie de la feuille de calcul pour un débit de 20 l/mn, 100% argon

ANNEXE E : COMPOSITION COMPLETE DES DIFFERENTS FILS

Elément (% mass.)	70 S	AS 26	AS 35	AS 42	S2MoTi	G002	G003	G004	G005	G006
B	0.0002			0.0007	0.0137					
C	0.087	0.0729	0.895	0.12	0.0791	0.071	0.07	0.074		
N	0.0062	0.0117	0.0048	0.0057	0.0043					
O	0.014	0.0429	0.0118	0.0146	0.047					
Al	< 0.001	< 0.003	0	0.044	0.034	0.005	0.005	0.005	0.01	0.01
Si	0.35	0.064	0.12	0.37	0.26	0.048	0.074	0.001	0.06	0.05
P	0.011			0.0059	0.0079					
S	0.011	0.021	0.0094	0.0089	0.0031					
Ca				0.0005	0.001	0.008	0.008	0.008		
Ti	0.001	< 0.003	< 0.003	0.303	0.105	0.002	0.94	0.002	< 0.02	< 0.02
V	0.002	0.004	0.003	0.012	0.004	0	0	0	0	0.004
Cr	0.022	0.062	0.0042	0.077	0.035	0.023	0.022	0.023	0.036	0.04
Mn	1.05	0.4	1.08	1.15	1.03	0.39	0.36	0.43		
Fe	98.17	99.0525	97.7698	95.9	96.3	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.
Co	0.008	0.008	0.005	0.01	1.03				0.42	0.41
Ni	0.058	0.074	0.026	0.063	0.008	0.025	0.023	0.023	0.026	0.03
Cu	0.16	0.16	0.054	0.15	0.071	0.022	0.022	0.022	0.02	0.02
As				0.0126	0.0057					
Se				0.0029	0.0021					
Zr	< 0.001			0.0023	0.0017	0.002	0.002	0.002	0.36	0.33
Nb	0.002	0.004	< 0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	
Mo	0.0318	0.01	0.007	0.51	0.51				0.004	
Sn				0.0024	< 0.001					
Sb				< 0.002	< 0.001					
W		0.007	0.004	0.005	0.005					
La									< 0.002	0.26
Li										
K										
Na										

1) Fils massifs et fils fourrés à bas silicium et avec du zirconium et du titane

Élément (% mass.)	G007	G008	G009	G010	G011	G012	Mégafil
B							0.0004
C							0.058
N							
O							
Al	0.089	<0,003	0.003	0.027	0.007	<0,003	0.005
Si	0.007	0.01	0.008	0.061	0.32	0.012	0.79
P							0.011
S							0.008
Ca							
Ti							0.003
V							0.001
Cr	0.025	0.025	0.024	0.023	0.025	0.024	0.04
Mn	0.34	0.34	0.34	0.35	0.35	0.37	1.55
Fe	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.
Co							0.005
Ni	0.037	0.037	0.038	0.037	0.039	0.037	0.026
Cu	0.02	0.021	0.021	0.021	0.023	0.023	0.072
As							
Se							0.0043
Zr							0.0027
Nb							0.004
Mo	0.009	0.008	0.009	0.008	0.008	0.008	0.05
Sn							0.0025
Sb							
W							0.009
La							
Li	0.005	0	0	0.005	0.005	0.143	0.017
K	0.009	0.009	0.15	0.093	0.102	0	0.46
Na	0.008	0.042	0.008	0.09	0.006	0.004	0.13

2) Fils fourrés contenant des alcalins

XI - BIBLIOGRAPHIE

- [1] S.Zielinska, "Propriétés physiques du plasma MIG-MAG", thèse en cotutelle de l'université d'Orléans (France) et de l'université Jagielonne de Cracovie (Pologne) 2005
- [2] C. Bonnet, « Le soudage : métallurgie et produits », pp77-80, documentation Air Liquide/ CTAS (2001)
- [3] G. Adam et T.A Siewert, "Sensing of GMAW Droplet Transfer Modes Using an ER100S-1 Electrode", *Welding Journal* pp 103-s/108-s (1990)
- [4] R. Hajossy, I Morva, Cathode and anode falls of arcs with fusible electrodes, *J. Phys. D* **27** pp2095-2101 (1994)
- [5] P.J. Modenesi, R.C. de Avelar et al., "The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability", *Journal of Materials Processing Technology* vol. **86** pp226–232,(1997)
- [6] L. Grad, J. Grum, I. Polajnar et al., "Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol. **44** pp555–561 (2003)
- [7] S.C. Absi Alfaro, G.C. Carvalho et S.A. de Melo Junior, "Stand off's indirect estimation in GMAW", *Journal of Materials Processing Technology* pp157–158 (2004)
- [8] M. Tanaka, M. Ushio, M. Ikeuchi et al., "In situ measurements of electrode work function in free-burning arcs during operation at atmospheric pressure", *J. phys. D* vol. **38** pp29–35 (2005)
- [9] G Yang, P. Cronin, J. V. Heberlein et al., "Experimental investigations of the anode boundary layer in high intensity arcs with cross flow", *J. phys D* vol. 39 pp2764–2774 (2006)
- [10] E. J. Soderstrom, "Influence of Ar-CO₂ mixtures and thin electrodes on metal transfer in gas metal arc welding, Thèse" - Faculty and Board of Trustees of the Colorado School of Mines (2006)
- [11] F. Molleda et al., "The importance of spatter formed in shielded metal arc welding", *Materials Characterization* (2006), doi:10.1016/j.matchar.2006.09.011 (in press)
- [12] P.M.G. P. Moreira, O. Frazao, S. M. O. Tavares et al., « Temperature field acquisition during gmaw using thermocouples, thermography and fibre Bragg grating sensors», *Meas. Sci. Technol.* Vol. **18** pp877–883 (2007)
- [13] A T. Zimmer, P A. Baron, "The influence of operating parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process", *Aerosol Science* vol **33**. pp519–531 (2001)
- [14] M. Suban, J. Tušek, "Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel, *International Journal of Hydrogen Energy*" vol.**25** pp369-376 (2000)
- [15] M. Suban, J. Tušek, "Methods for the determination of arc stability", *Journal of Materials Processing Technology* pp430–437 (2003)
- [16] M.Suban et J.Tusek, "Dependance on melting rate in MIG--MAG welding on the type of shielding gas used", *Journal of Materials Processing Technology* vol. **119** pp185-192 (2001)
- [17] D. Iordachescu, L. Quintino, R. Miranda et al., "Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates", *Materials and Design* vol.**27** pp381–390 (2004)
- [18] Pires, L. Quintino et R.M. Miranda, "Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate", *Materials and Design* vol.**28**

pp1623–1631 (2006)

- [19] M. Tanaka, S. Tashiro, M. Ushio et al, “CO₂ shielded arc as a high-intensity heat source”, *Vacuum* vol. **80** pp1195–1198 (2006)
- [20] L. Shanping, F. Hidetoshi et N. Kiyoshi, “Marangoni convection in weld pool in CO₂-Ar-shielded gas thermal arc welding”, *Metallurgical and material transaction* vol.**35A** pp2861-2867 (2004)
- [21] L. Shanping, F. Hidetoshi et N. Kiyoshi, “Effect of CO₂ shielding gas addition and welding speed on GTA weld shape”, *Journal of materials science* vol.**40** pp2481–2485 (2005)
- [22] R. Kaçar et K. Kökemli, “Effect of controlled atmosphere on the mig-mag arc weldment properties”, *Materials and Design* vol. **26** pp508–516 (2005)
- [23] H. Ates, “Prediction of gas metal arc welding parameters based on artificial neural networks”, *Materials and Design* vol. **28** pp2015–2023 (2006)
- [24] Y. H. Chang, “Improve GMAW and GTAW with alternating shielding gas”, *Welding journal* pp41-43 (2006)
- [25] P. Teulet, L. Girard, M Razafinimanana, A. Gleizes, “Experimental study of an oxygen plasma cutting torch II_Arc-material interaction, energy transfer and anode attachment”, *J. phys. D* vol. **39** pp1557–1573 (2006)
- [26] P. Teulet, L. Girard, M Razafinimanana, A. Gleizes et al., “Experimental study of an oxygen plasma cutting torch: I. Spectroscopic analysis of the plasma jet”, *J. phys. D* vol. **39** pp1543–1556 (2006)
- [27] M. A. Wahab, M. S. Alam, M.J. Painter et al., “Experimental and numerical simulation of restraining forces in gas metal arc welded joints”, *Welding journal* pp35-s/43-s (2006)
- [28] G. Campana et al., The influence of arc transfer mode in hybrid laser-mig welding, *J. Mater. Process. Tech.* (2007), doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.03.001 (in press)
- [29] G. Tani et al., The influence of shielding gas in hybrid LASER–MIG welding, *Appl. Surf. Sci.* (2007), doi:10.1016/j.apsusc.2007.02.144 (in press)
- [30] A. Lesnewich, “Electrode Activation for Inert-Gas-Shielded Metal-Arc Welding”, *Welding Journal* pp1167-1178 (1955)
- [31] E. Cushman, “Electrode for Spatter-Free Welding of Steel in Carbon Dioxide, *Welding Journal*”, pp14-s/21-s (1961)
- [32] E Bauné, C Bonnet et S. Liu, “Rare-earth metal compound investigation for weld metal oxygen control in flux cored arc welding”, *International Symposium on Metal Welding and Applications* (1999)
- [33] M.S.P. Murthy et C.R Lopper, GMA “weldability characteristics of Lanthanide-Containing High-strength steels, part 1 : arc and metal transfer”, *Welding Journal* pp59-s/67-s (1989)
- [34] J H Waszink, G.J.P.M Van den Neuvel, “Heat generation and heat flow in the filler metal in GMA welding” *Welding Journal* pp269s-282s (1982)
- [35] L A Jones, T W Eagar et J. H. Hang, “A dynamic model of drops detaching for gas metal arc welding electrodes”, *J. phys D* vol.**31** pp107–123 (1998)
- [36] L A Jones, T W Eagar et J. H. Hang, “Magnetic forces acting in molten drops on gas metal arc welding”, *J. phys D* vol. **31** pp93–106 (1998)
- [37] J. Hu et H.L. Tsai, “Effects of current on droplet generation and arc plasma in gas metal arc welding”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol.**100** (2006)
- [38] J. Hu et H.L. Tsai, “Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol. **50** pp833–846 (2006)

- [39] J. Hu et H.L. Tsai, “Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part II: The metal”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol. **50** pp808–820 (2006)
- [40] P.J. Modenesi et R.I. Reis, “A model for melting rate phenomena in GMA welding”, *Journal of Materials Processing Technology* vol. **189** pp199–205 (2007)
- [41] I.S. Kim et A. Basu, “A mathematical model of heat transfer and fluid flow in the gas metal arc welding process”, *Journal of Materials Processing Technology* vol. **77** pp17–24 (1998)
- [42] Y. Wang et H.L. Tsai, “Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol. **44** pp2067-2080 (2000)
- [43] Y. Wang et H.L. Tsai, Effect of surface active elements on weld pool fluid flow and weld penetration in gas metal arc welding, *Metallurgical and materials transactions* vol. **32B** pp501-515 (2001)
- [44] A. Kumar et T. DebRoy, “Calculation of three-dimensional electromagnetic force field during arc welding”, *Journal of applied physics* vol. **94** n°2 pp1267-1277 (2003)
- [45] A. Kumar et T. DebRoy, “Improving reliability of modelling heat and fluid flow in complex gas metal arc fillet welds—part II: application to welding of steel”, *J. phys D* vol. **38** pp127–134 (2004)
- [46] S. Mishra et T. DebRoy, “A heat-transfer and fluid-flow-based model to obtain a specific weld geometry using various combinations of welding variables”, *Journal of applied physics* vol. **98** (2005)
- [47] K Choi, W. Kim, K Kim et al., “Large-scale finite element analysis of arc-welding processes”, *J. phys. D* vol. **39** pp2869–2875 (2006)
- [48] X. Huang et S. Chen, “SVM-based fuzzy modeling for the arc welding process”, *Materials Science and Engineering* vol. **A427** pp181–187 (2006)
- [49] X. Guoxiang et W. Chuansong, “Numerical analysis of weld pool geometry in globular-transfer gas metal arc welding”, *Front. Mater. Sci. China* p24-29 (2007)
- [50] S.W. Simpson, P. Xu, M. Rados, "Transfer Mode Transitions in GMAW, 45th Internat. Conf. Welding Joining Research (1997)
- [51] J. Haidar, J. J. Lowke, “Predictions of metal droplet formation in arc welding”, *J. Phys. D* **29** p2951 (1996)
- [52] J. Haidar, “Effect of CO₂ shielding gas on metal droplet formation in arc welding”, *IEEE Transactions on Plasma Science* **25**, pp931-936 1997
- [53] J. Haidar, “An analysis of the formation of metal droplets in arc welding”, *J. phys. D* **31** pp1233-1244 (1998)
- [54] J. Haidar, “A theoretical model for gas metal arc welding and gas tungsten arc welding”, *J. Appl. Phys* vol. **84** p3518 (1998)
- [55] J. Haidar, “Predictions of metal droplet formation in gas metal arc welding.”, *J. Phys. D* **84** p3530 (1998)
- [56] J. Haidar, “Metal droplet formation in gas metal arc welding”, *Journal of Technical Physics* p257 (2000)
- [57] J. Haidar, “Non-equilibrium modelling of transferred arcs, *J. phys. D* **32** pp263-272 (1999)
- [58] R. T. Deam, S. W. Simpson et J Haidar, “A semi-empirical model of the fume formation from gas metal arc welding”, *J. phys. D* vol. **33** pp1393–1402 (2000)
- [59] F. Wang, W. K. Hou, S. J. Hu et al., “Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding”, *J. phys D* vol. **36** pp1143–1152 (2003)
- [60] G. Wang, P.G. Huang et Y.M. Zhang, “Numerical analysis of metal transfer in gas metal arc welding”,

Metallurgical and material transaction vol. **34B** pp345-353 (2003)

- [61] H. G. Fan et R Kovacevic, “A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool”, J. phys. D vol. **37** pp2531–2544 (2004)
- [62] K. Ramachandran, J.-L. Marqués, R Vaßen et al., “Modelling of arc behaviour inside a F4 APS torch”, Computational Materials Science vol. **39** pp3323–3331 (2006)
- [63] S. Tashiro, M. Tanaka, M. Ushio et al., “Prediction of energy source properties of free-burning arcs”, Vacuum vol. **80** pp1190–1194 (2006)
- [64] L. Sansonnens, J. Haidar et J J Lowke, “Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion”, J. phys. D vol. **33** pp148–157 (2000)
- [65] A. De et T. DebRoy, “Probing unknown welding parameters from convective heat transfer calculation and multivariable optimisation”, J. phys. D vol. **37** pp140–150 (2003)
- [66] F. Lu, S. Yao, S. Lou et al., “Modelling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool”, computational Materials Science vol. **29** pp371–378 (2004)
- [67] F. Lago, J. J. Gonzalez, P. Freton et al., “A Numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode : Part I. The two dimensional model”, J. phys. D vol.**37** pp883–897 (2004)
- [68] F. Lago, J. J. Gonzalez, P. Freton et al., “Numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: part II. The three-dimensional model—influence of external forces on the arc column”, J. phys. D vol.**38** pp306–318 (2005)
- [69] M. Tanaka, M. Ushio et J. Lowke, “Numerical study of gas tungsten arc plasma with anode melting”, Vacuum vol. **73** pp381–389 (2004)
- [70] J. J. Lowke, M. Tanaka et M. Ushio., “Mechanisms giving increased weld depth due to a flux”, J. phys. D vol. **38** pp3438–3445 (2005)
- [71] J. J. Lowke et M Tanaka, “ ‘LTE-diffusion approximation’ for arc calculations”, J. phys. D vol. **39** pp3634–3643 (2006)
- [72] R. Bini, M. Monno et M. I. Boulos, “Numerical and experimental study of transferred arcs in argon” , J. phys. D vol.**39** pp3253–3266 (2006)
- [73] H.-P. Li et M. S. Benilov, “Effect of a near-cathode sheath on heat transfer in high-pressure arc plasmas”, J. phys. D vol. **40** pp2010–2017 (2007)
- [74] C.D. Allemand, R. Schoeder, D.Ries et T.W. Eagar, “A method of filming metal transfer arc in welding arcs”, Welding Journal pp 45-47 (1985)
- [75] H.Waszink et J. Piena, “Thermal Processes in Covered Electrodes”, Welding Journal pp 37-s 48-s (1985)
- [76] J.H. Chen, D. Fan, Z.Q. He, J. Ye et al., “A Study of the Mechanism for Globular Metal Transfer From Covered Electrodes”, Welding Journal pp 145-s/150-s (1989)
- [77] S. Liu et T.A. Siewert, “Metal transfer in gas metal arc welding : Droplet rate”, Welding Journal pp52-s-58-s (1989)
- [78] S. Subramaniam, D. R. White, D.J. Scholl, “In situ optical measurement of liquid drop surface tension in gas metal arc welding”, J. phys. D vol. **31** pp1963–1967 (1998)
- [79] S. Subramaniam, D. R. White, D.J. Scholl et al., “Effect of shielding gas composition on surface tension of steel droplets in a gas-metal-arc Welding arc”, Metallurgical and materials transactions vol. **32B** pp1963–1967 (2001)
- [80] Q. Lin, X. Li et S. W. “Simpson, Metal transfer measurements in gas metal arc welding” , J. phys. D vol. **34** pp347–353 (2001)

- [81] C. Xu, H. Gao et L. Wu, "Application of Monochromatic Image Method in Arc Plasma Diagnostics", *IEEE transactions on plasma science* vol. **33**, n°2 pp304-305 (2005)
- [82] Z. Sun, Q. Chen, W. Zhang et al., A novel visual image sensor for CO₂ short circuiting arc welding and its application in weld reinforcement detection, *Meas. Sci. Technol* vol.**17** pp3212–3220 (2006)
- [83] Y. M. Zhang, H. S. Song et G. Saeed, "Observation of a dynamic specular weld pool surface", *Meas. Sci. Technol* vol.**17** L9-L12 (2006)
- [84] Z. Guangjun, Y. Zhihong et W. Lin, Reconstructing a three-dimensional P-GMAW weld pool shape from a two-dimensional visual image, *Meas. Sci. Technol* vol. **17** pp1877–1882 (2006)
- [85] D. D. Harwig, J. E. Dierksheide D. Yapp, et S. Blackman, "Arc behavior and Melting rate in the VP-GMAW Process", *Welding journal* pp52-s-62-s (2006)
- [86] Z. Z. Wang et Y. M. Zhang, "Image processing algorithm for automated monitoring of metal transfer in double-electrode GMAW", *Meas. Sci. Technol* vol.**18** pp2048–2058 (2007)
- [87] I. L. Babich, A. N. Veklich, V. A. Zhovtyanskii et A. I. Cheredarchuk, "Physical features and diagnostics of the plasma of a free-burning copper-vapor electric arc", *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* vol. **71** n°1 pp127-134 (1998)
- [88] F. Könemann, G. Kühn, J. Reiche et M Kock, "Near-cathode region of a free-burning arc: a spectroscopic investigation", *J. phys. D* vol. **37** pp171–179 (2003)
- [89] L. O. Vilarinho et A. Scotti, "Proposal for a modified Fowler-Milne method to determine the temperature profile in TIG welding at low current", *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.* vol. **XXVI** n° 1 pp34-39 (2004)
- [90] G. Kühn et M. Kock, "A spatially resolved relaxation method for pLTE plasma diagnostics in free-burning arcs", *J. phys. D* vol.**39** pp2401–2414 (2005)
- [91] Y. T. Cho et S.-J. Na, "Application of Abel inversion in real-time calculations for circularly and elliptically symmetric radiation sources", *Meas. Sci. Technol* vol. **16** pp878–884 (2005)
- [92] M. Redwitz, O. Langenscheidt et J. Mentel, "Spectroscopic investigation of the plasma boundary layer in front of HID-electrodes", *J. phys. D* vol. **38** pp3143–3154 (2005)
- [93] J. Mirapeix, A. Cobo, O.M. Conde, C. Jaúregui et al., "Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis" *NDT&E International* vol. **39** pp356–360 (2005)
- [94] J. Mirapeix, A. Cobo, O.M. Conde, C. Jaúregui et al., "Fast algorithm for spectral processing with application to on-line welding quality assurance", *Meas. Sci. Technol* vol. **17** pp2623–2629 (2006)
- [95] J. Torres, M.J. van de Sande, J.J.A.M. van der Mullen, A. Gamero et A. Sola, "Stark broadening for simultaneous diagnostics of the electron density and temperature in atmospheric microwave discharges", *Spectrochimica Acta*, (2005) (in press)
- [96] J. Torres, M.J. van de Sande, J.J.A.M. van der Mullen, A. Gamero et A. Sola, "The Stark-crossing method for simultaneous determination of the electron temperature and density in plasma", *Journal of Physics: Conference Series* vol. **44** pp70–79 (2006)
- [97] S. C.A. Alfaro, D de S. Mendonça et M. S. Matos, "Emission spectrometry evaluation in arc welding monitoring system", *Journal of Materials Processing Technology* vol. **179** pp219–224 (2006)
- [98] G. Agapiou, C. Kasiouras et A.A. Serafetinides, "A detailed analysis of the MIG spectrum for the development of laser-based seam tracking sensors", *Optics & Laser Technology* vol. **31** pp157-161 (1999)
- [99] H. GuoMing, Y. ShaoHui, C. XinHua et L. JunYue, "Acquisition and pattern recognition of spectrum information of welding metal transfer", *Materials and Design* vol. **24** pp699–703 (2003)

- [100] H. Terasaki, M. Tanaka et M. Ushio , “Effect of metal vapor on electron temperature in helium gas tungsten arcs, Metallurgical and materials transactions” vol. **33A** pp1183-1188 (2002)
- [101] G. Yang et J. Heberlein, “Anode attachment modes and their formation in a high intensity argon arc”, Plasma Sources Sci. Technol vol. **16** pp529–542 (2007)
- [102] R. M. Mirza, R. Gee, “Effects of shielding gases on weld diffusible hydrogen contents using cored wires”, Science and technology of welding and joining vol. **4** n°2, pp104-111 (1999).
- [103] W. Wang, S. Liu et J.E. Jones, “Flux cored arc welding: arc signals, processing and metal transfer characterization”, Welding Journal pp369-s 377-s (1995)
- [104] M. T. Liao et W. J. Chen, “A Comparison of Gas Metal Arc Welding with Flux Cored Arc Welding and Solid Wires Using Shielding Gas”, Int J Adv Manuf Technol vol. **15** pp49-53 (1999)
- [105] D.E. Clark, A.D. Watkins et P.E. Murray, “In process diagnostic for flux cored arc welding of steel”, 5th Int. Conf.: Trends in Welding Research, Pine Mountain pp379-382 (1999)
- [106] E Bauné, C. Bonnet et S. Liu, “Assessing metal transfer stability and spatter severity in flux cored arc welding”, Science and Technology of Welding & Joining vol. **6** n°3 pp139-148 (2001)
- [107] N. M. Ramini de Rissone, H. G. Svoboda, E. S. Surian et al., “Influence of procedure variables on C-Mn-Ni-Mo metal cored wire ferritic all-weld metal”, Welding journal pp139-s 148-s (2005)
- [108] N. T. Jenkins, W. M.–G. Pierce et T. W. Eagar, “Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes”, Welding journal pp156-s/163-s (2005)
- [109] T. Kannana et N. Murugan, “Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality”, Journal of Materials Processing Technology vol. **176** pp230–239 (2006)
- [110] S. Mukhopadhyay et T.K. Pal, Effect of shielding gas on gmaw of hsla steel using solid and flux cored-wires, Int J Adv Manuf Technol vol. **29** pp262–268 (2006)
- [111] S-G. Liu, J-M. Wu, S-C. Zhang et al., “High temperature erosion properties of arc-sprayed coatings using various cored wires containing Ti–Al intermetallics”, Wear vol. **262** pp555–561 (2006)
- [112] P. K. Palani et N. Murugan, “Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding”, Int J Adv Manuf Technol vol. **30** pp669–676 (2006)
- [113] P.K. Palani et N. Murugan, “Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW”, Journal of Materials Processing Technology vol. **190** pp291–299 (2007)
- [114] F. Valensi, “Contribution à l’étude de l’armorçage des arcs de soudage MIG-MAG” , DEA Physique des plasmas, Université Paris XI-Orsay (2004)
- [115] E.L.Murthy, R. H. Good, “Thermionic Emission, Field Emission ant the Transitions Regions”, Phys. Rev. vol. **102** p1964 (1956)
- [116] A.E. Cuile, IEEE Rev. 118 p1131 (1971)
- [117] F.A. Halden, W.D. Kingery, J. Phys. Chem **59** P557 (1955)
- [118] V. A. Nemchinsky, The effect of the type of plasma gas on current constriction at the molten tip of an arc electrode, J. Phys. D **29** p1202 (1996)
- [119] S. Rhee, E. Kannatey-Asibu, “Observation of metal transfer during GMAW”, Welding Journal p381-s, (1992)
- [120] J.Glasser, J.Chapelle, B.Boattner, *Applied Optic* **17-23** (1978)
- [121] J.Chapelle, « L’arc électrique et ses applications: Etude physique de l’arc électrique - Tome 1 », Ed. CNRS (1984)
- [122] T. R. O’Brian, M. E. Wickliffe, J. E. Lawler, W. Whaling, J. W. Brault, Lifetimes, transition

probabilities, and energy level in FeI, *J. Opt. Am.* (1991)

- [123] B. Pokrzywka, "Równowagowe i spektroskopowe własności plazmy w sąsiedztwie katody łuku elektrycznego", Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej, Kraków (2003)
- [124] J.A.Aparicio, C.Pérez, J.A.del Val, M.A.Gigosos, M.I. de la Rosa, S.Mar, *J.Phys.B* **31** pp4909-4918 (1998)
- [125] H.R. Griem, « Plasma Spectroscopy », New York: McGraw-Hill (1964)
- [126] A. Sola, A. Gamero, J. Cortino, M. S´aez, C. Lao, M. D. Calzada, M. C. Quintero, J. Ballesteros, ICPIG XX Barga (Italy, 5-12 July 1991) Book of Contributed Papers p.1147 (1991)
- [127] J. Torres, J. Jonkers, M. J. van de Sande, J. J. A. M. van der Mullen, A. Gamero and A. Sola, "An easy way to determine simultaneously the electron density and temperature in high-pressure plasma by Stark broadening", *J. Phys. D* **36**, pp55-59 (2003)
- [128] S.Pellerin, K. Musiol, B. Pokrzywka, J. Chapelle, "Stark width of the 696.5nm argon I line", *J.Phys.B* **29** pp3911-3924 (1996)
- [129] A.Lesage, J.L.Lebrun, J.Richou, "Temperature dependence of stark parameters for Fe I lines", *Astrophys. J.* **360** pp737-740 (1990)
- [130] N.Konjevic, A.Lesage, J.R.Fuhr, W.L.Wiese, "Experimental Stark Widths and Shifts for Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms", *J.Phys.Chem.Ref.Data* **31** (2002)
- [131] S.Nowak, A.C.A.P. van Lammeren, J.A.M. van der Mullen, ISPC 8 Tokyo, P-027, pp398-403(1987)
- [132] B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, E.Pawelec, J.Chapelle, "Spectroscopic investigation of equilibrium state in electric arc cathode region", *J. Phys.D* **29-10** pp2644-2649 (1996)
- [133] P.Fauchais, J.F. coudert, M. Vardelle, "Diagnostics in thermal plasma processing", Academic Press Inc. pp349-446 (1989)
- [134] H. M. Crosswhite, *J. Res. NBS (U.S.)* 79a, **17** (1975). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [135] M. Martinez-Garcia, W. Whaling, D. L. Mickey, and G. M. Lawrence, *Astrophys. J.* **165**, p213 (1971) NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [136] J. M. Bridges and R. L. Kornblith, *Astrophys. J.* **192**, p793 (1974). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [137] M. May, J. Richter, and J. Wichelmann, *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* **18**, p405 (1974). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [138] J. M. Bridges, "Contributed Papers--International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 11th," p418 (Ed. I. Stoll, Czech. Acad. Sci., Inst. Phys., Prague, Czech) (1973). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [139] G. Norlen, *Phys. Scr.* **8**, p249 (1973). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [140] J. B. Shumaker, Jr. and C. H. Popenoe, *J. Opt. Soc. Am.* **57**, p8 (1967). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [141] J.Halenka et B.Grabowski, "Atomic partition function for iron", *Astron.Astrophys.Suppl.Ser.* **57** pp43-49 (1984)
- [142] J.Halenka et B.Grabowski, "Remarks on Atomic Partition Function, thr Exemple of Tin", *Astron. Astrophys.* **54**pp757-764 (1977)
- [143] S.Pellerin, "Etude de la région cathodique d'un arc soufflé", Thèse de l'Université d'Orléans, France (1994)

- [144] A.B.Murphy, C.J.Arundell, *Plasma Chem. Plasma Process.* **14** p451 (1994)
- [145] R. F. Jerrell, *J. Opt. Soc. Am.* **45**, p259 (1955)
- [146] V.N.Korobenko, M.B.Agranat, S.I.Ashitkov et A.I.Savvatimskiy, "Zirconium and Iron Densities in a Wide Range of Liquid States" *International Journal of Thermophysics*, vol. **23** no. 1, (2002)
- [147] G. Wille, "Propriétés thermophysiques et structurales du fer et des oxydes de fer liquides", Thèse de l'université d'Orléans, France (2002)
- [148] F. J. Lancaster, Anon.. "Classification of metal transfer" IIW DOC XII-636-76 (1976)
- [149] A. Adachi, K. Ogino, S. Kawasaki : *Technolog. Rep. Osaka Univ* 13 n°580 pp411-415 (1963).
- [150] Kanchan Gaur, S.C. Verma, H. B. Lal, "Defects and electrical conduction in mixed lanthanum transition metal oxides", *Journal of Materials Science* 23 n°5 pp1725-1728
- [151] I.A. Leonidov, V.L. Kozhevnikov, M.V. Patrakeev et al., "High-temperature electrical conductivity of Sr_{0.7}La_{0.3}FeO_{3- δ} ", *Solide Stats Ionics* vol.144 pp361-369 (2001)
- [152] M.Sh. Khalil, "Influence of Iron Content on the Electrical and Dielectric Properties of La_{0.7}Ba_{0.3}Co_{1-y}FeyO₃", *Zeitschrift für Physicalische Chemie* vol.**217** pp1387-1398, (2003)
- [153] T. Kidd, D.R. Gaskel, "Measurement of the Surface Tension of Fe-Saturated Iron Silicates ant Fe-Saturated Calcium-Ferrite Meltes by Padday's Cone Technique", *Metallurgical Transactions B* 17B pp771-776 (1986)
- [154] P. Kozakevitch, *Rev. Metallurg.* Vol. **46** pp505-516 (1949)
- [155] H. Schenk, M.G. Froberg, W. Rohde: *Arch. Eisenhüttenwes* vol.**32** pp521-523, (1961)
- [156] J.F. Bacon, A.A. Hasapis, Research and advanced development division. Willmington/Mass.
- [157] *Handbook on property of liquide iron and slag*, Tokyo (1972)
- [158] J. F. Lancaster, "The physics of welding", Pergamon Press (1984)
- [159] I.Velchev, W.Hogervorst et W.Ubachs, *J. Phys.* vol.**B 32**, L511 (1999). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [160] J. Sugar et C. Corliss, *J. Phys. Chem. Ref Fata* vol.**14**, 1-664 (1985). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [161] J.E. Sohl, Y. Zhu, R.D.Knight, *J. Opt. Soc. Am.* vol.**B7**, p9-14 (1990). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [162] P.A. Hackett, M.R. Humphries, S.A. Mitchell, and D.M. Rayner, *J. Chem. Phys.* vol. **85**, pp3194-3197 (1986). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [163] W.R.S Garton et M. Wilson, *Astrophys. J.* vol. **145**, p333 (1966). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [164] C.J.Lorenzen and K.Niemax, *J. Phys.* vol. **B15**, L139-L145 (1982). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [165] J.F. Baugh, C.E. Burkhardt, J.J. Leventhal, and T. Bergeman, *Phys. Rev.* vol. **A 58**, p1585 (1998). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [166] C.J.Lorenzen et K.Niemax, *Phys. Scr.***27**, pp300-305 (1983). NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/asd3>
- [167] S.Zielinska, S.Pellerin, F.Valensi, K.Dzierzega, K.Musiol, Ch de Izarra & F.Briand "Investigations of GMAW plasma by optical emission spectroscopy", *Plasma Sources Science and Technology* vol. **16** pp832-838 (2007)

Titre Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG

Résumé Le procédé de soudage MIG-MAG repose sur l'utilisation d'un arc électrique pour transférer des gouttes de métal fondu d'une électrode consommable (l'anode) vers la pièce à souder (la cathode) sous protection gazeuse. Différents régimes de transfert existent selon le choix notamment du courant et la composition du gaz de protection : le régime de pulvérisation axiale, préféré par les utilisateurs, est obtenu pour un courant suffisamment élevé sous argon seul ; Pour un moindre courant ou lorsque du CO₂ est ajouté en quantité suffisante, le transfert devient globulaire.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est de définir les conditions permettant d'obtenir le régime de pulvérisation axiale pour le taux de CO₂ dans le gaz de protection le plus élevé et/ou un courant d'arc le plus faible possible. Les travaux réalisés sont basés sur l'observation de l'arc par imagerie rapide pour déterminer les conditions de la transition entre les deux régimes. Le diagnostic de la colonne de plasma a été réalisé par spectroscopie optique d'émission en utilisant une méthode originale donnant accès à la température et la densité électronique sans hypothèse sur l'état d'équilibre du milieu. Les résultats ont permis de déterminer la répartition des vapeurs métalliques dans la colonne pour différents régimes de fonctionnement.

L'analyse en microscopie électronique à balayage de l'anode a permis de comprendre les phénomènes s'y produisant lors de la transition entre les régimes globulaires et de pulvérisation axiale. En particulier, les éléments minoritaires de l'acier constituant l'anode ont une grande influence sur les résultats, leur contrôle permet une amélioration des performances.

Mots clés Soudage, Plasma, Spectroscopie, Analyse MEB, Imagerie rapide

Titre Contribution to study of phenomena related to anodic and cathodic effects in GMAW

Abstract The gas metal arc welding (GMAW) process is based on the use of an electric arc to transfer melted metal droplets from a consumable electrode (the anode) to the welded plate (the cathode) under controlled shielding gas. Various transfer modes can occur, according in particular to the choice of the welding current and shielding gas composition. The spray transfer mode, that users prefer, is obtained for a high enough current under pure argon; For a lower current or when CO₂ is added in the gas in sufficient concentration, the transfer becomes globular, with a lower quality.

The purpose of the work presented in this memoir is to define the conditions allowing to get the spray transfer mode for the highest possible CO₂ concentration in the shielding gas and/or the lowest possible arc current value. The study is based on high-speed arc image observation to characterize the conditions of transition between the two transfer modes. The plasma column diagnosis has been carried on by optic emission spectroscopy using an original method leading to get electronic temperature and density without hypothesis on the equilibrium state of the plasma. The data obtained allowed to map the metallic vapours repartition in the column for various working modes.

Scanning electron microscopy analysis of the consumable electrode led to the understanding of the phenomenon occurring at electrodes during the transition between globular and spray transfer modes. In particular, it appears that the alloying elements present in consumable electrode's steel have a large influence on the obtained results and that their control allows a significant improvement of the welding process performances.

Keywords Welding, Plasma, Spectroscopy, SEM analysis, High-speed visualisation

Discipline – spécialité doctorale Physique des plasmas

Intitulé et adresse du laboratoire

LASEP : Laboratoire d'Analyse Spectroscopique et d'Energétique des Plasmas – UPRES EA 3269
Université d'Orléans, Faculté des Sciences – Site de Bourges
Rue Gaston Berger, B.P.4043 - 18028 Bourges Cedex (France)
tél (33) [0]2 48 27 27 30 / courriel : LASEP@univ-orleans.fr
