

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblage soudée et matériaux

Par : BOUZINAE bilal

Sujet

Réglage du poste de soudage MIG/MAG

Sous la contrainte des paramètres de soudage

M. BENSAID Ismail	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M. RAHOU Mohammed	Professeur	ESAA.Tlemcen	Co-Encadreur
M. SEBAA Fethi	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
M. BRAIRI Samir	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire

2025 /2026

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier dieu tout-puissant de m'avoir accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Au terme de ce projet de fin d'études réalisé au sein du département de Génie Mécanique, dans le cadre du master en Génie Mécanique option « ASM », j'exprime ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

*Je remercie sincèrement le **Professeur SEBAA Fethi** pour m'avoir encadré dans ce travail.*

Ses conseils, son suivi rigoureux et ses orientations pertinentes ont été essentiels à la réussite de ce projet.

*J'adresse également mes remerciements au co-encadrant **Professeur RAHOU Mohammed** pour son soutien, sa disponibilité et ses précieuses recommandations tout au long de ce travail.*

Je remercie aussi les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, ainsi que pour le temps consacré à son évaluation.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce projet.

DEDICACES

Je dédie ce travail à ma famille, qui a toujours été une source de soutien et de force tout au long de mon parcours académique, et qui n'a jamais cessé de m'encourager à chaque étape.

Je le dédie également à mes amis, qui m'ont accompagné durant cette aventure universitaire et qui ont été un véritable soutien moral grâce à leurs encouragements constants.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, que ce soit par leurs conseils, leur aide ou leur accompagnement.

Ce travail est le fruit de votre soutien à tous, en reconnaissance de votre présence et de votre appui tout au long de cette étape importante de ma vie.

Résumé

Cette étude porte sur le procédé de soudage MIG/MAG, largement utilisé dans l'industrie moderne grâce à sa rapidité, sa productivité et la qualité des assemblages obtenus. Ce procédé est appliqué dans plusieurs domaines tels que l'industrie automobile, la construction métallique et la fabrication mécanique.

Le travail s'intéresse à l'analyse des différents paramètres influençant la qualité du soudage, notamment le courant, la tension, la vitesse d'avance du fil, le débit du gaz de protection et le diamètre du fil. Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la stabilité de l'arc et la qualité finale du cordon de soudure.

La problématique de ce travail est la suivante : comment améliorer le choix et le réglage des paramètres de soudage MIG/MAG à travers le développement d'un module intégré dans un environnement de soudage assisté par ordinateur (CAW) afin d'optimiser la qualité et la précision du procédé ?

Pour répondre à cette problématique, un module logiciel a été développé afin d'aider l'utilisateur à calculer et sélectionner facilement les paramètres de soudage de manière rapide et fiable.

Le mémoire est structuré en trois chapitres : un premier chapitre consacré aux généralités du procédé MIG/MAG, un deuxième chapitre dédié aux équipements et paramètres de soudage, et un troisième chapitre présentant le développement du module CAW.

Mots clés : MIG MAG, GMAW, paramètres de soudage, poste de soudage MIG MAG, Visual studio code, CAW.

Abstract

This study focuses on the MIG/MAG welding process, which is widely used in modern industry due to its high productivity, fast operation, and good weld quality. It is commonly applied in fields such as automotive manufacturing, metal construction, and mechanical engineering.

The work analyzes the main parameters affecting welding quality, including current, voltage, wire feed speed, shielding gas flow rate, and wire diameter. These parameters play a crucial role in arc stability and final weld quality.

The main research problem is: how to improve the selection and adjustment of MIG/MAG welding parameters by developing a module integrated into a Computer-Aided Welding (CAW) environment in order to enhance process quality and precision?

To address this issue, a software module was developed to assist users in quickly and accurately calculating and selecting appropriate welding parameters.

The thesis is structured into three chapters: the first presents general concepts of MIG/MAG welding, the second covers equipment and welding parameters, and the third describes the development of the CAW module.

Keywords : MIG/MAG, GMAW, welding parameters, welding equipment MIG/MAG ,visual studio code, CAW.

الملخص.

تتناول هذه المذكرة موضوع اللحام MIG/MAG باعتباره أحد أهم عمليات اللحام المستخدمة في الصناعة الحديثة، لما يتميز به من سرعة تنفيذ، وجودة جيدة للوصلات، وإمكانية الأتمتة في مختلف التطبيقات الصناعية مثل صناعة السيارات، البناء المعدني، والصناعة الميكانيكية.

يرتكز هذا العمل على دراسة مختلف جوانب عملية اللحام MIG/MAG ، حيث تم التطرق إلى مبدأ عمل هذا النوع من اللحام، المعدات المستعملة، إضافة إلى أهم المعلومات المؤثرة على جودة اللحام مثل شدة التيار، التوتر، سرعة تغذية السلك، نوع وكمية غاز الحماية، وقطر سلك اللحام. كما تم توضيح تأثير كل معلمة على استقرار القوس وجودة المردود النهائي.

وتتمثل الإشكالية الرئيسية لهذه الدراسة في:

كيف يمكن تحسين اختيار وضبط معلومات اللحام MIG/MAG من خلال تطوير وحدة برمجية داخل بيئة لحام مساعد بالحاسوب (CAW) بما يضمن جودة أفضل ودقة أعلى في عملية اللحام؟

وللإجابة عن هذه الإشكالية، تم اقتراح تطوير وحدة برمجية داخل بيئة CAW تساعد المستخدم على حساب واختيار معلومات اللحام بشكل دقيق وسريع، اعتماداً على علاقات ومعايير تقنية مدروسة، مما يساهم في تقليل الأخطاء وتحسين جودة اللحام.

تم تقسيم المذكرة إلى ثلاثة فصول رئيسية:

- الفصل الأول: تقديم عام لعملية اللحام MIG/MAG ومبادئها.
 - الفصل الثاني: دراسة المعدات والمعلومات المؤثرة في عملية اللحام.
 - الفصل الثالث: عرض تصميم وتطوير الوحدة البرمجية داخل بيئة CAW وشرح طريقة عملها.
- وفي الأخير، خلص العمل إلى أهمية استخدام الأدوات الرقمية في تحسين عمليات اللحام، مع اقتراح بعض الآفاق المستقبلية لتطوير النظام وجعله أكثر دقة وذكاء.

الكلمات المفتاحية: اللحام بالقوس الكهربائي المعدني المحمي بالغاز الخامل أو النشط، اعدادات التلحيم تجهيزات، آلة التلحيم

، Visual studio code ، وحدة برمجية ضمن بيئة تصميم بمساعدة الحاسوب.

Sommaire

Remerciements	I
DEDICACES.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
المخلص.....	V
Liste des figures.....	XI
Abréviations.....	XVII
Introduction générale.....	20
Chapitre I: Généralités sur le soudage MIG/MAG	
I.1. Introduction	22
I.2. Historique	22
I.3. Définition du soudage MIG/MAG	24
I.4. Principe du procédé MIG/MAG	25
I.5. Avantages du procédé MIG/MAG	27
I.6. Inconvénients du procédé MIG/MAG.....	27
I.7. Domaine d'application.....	28
I.8. Paramètres du procédé MIG/MAG	29
I.8.1. Courant de soudage.....	30
I.8.1.1. Courant continu DC	31
I.8.1.2. Courant pulsé	32
I.8.1.3. Double pulsed MIG/MAG	33
I.8.1.4. Courant alternatif AC.....	33
I.8.2. Tension de soudage.....	34
I.8.3. Vitesse de soudage	35
I.8.4. Gaz de protection	36

I.8.5.	Vitesse de dévidage du fil	37
I.8.6.	Diamètre du fil électrode	37
I.8.7.	Métal d'apport	38
I.8.8.	Distance torche-pièce	39
I.8.9.	Angle de la torche	40
I.8.9.1.	Angle de travail	40
I.8.9.2.	Angle de déplacement	40
I.9.	Modes de transfert du soudage MIG/MAG	41
I.9.1.	Transfert par court-circuit (short arc)	41
I.9.2.	Transfert globulaire (globular transfer)	43
I.9.3.	Transfert par pulvérisation axiale (spray transfer)	44
I.9.4.	Transfert pulsé (pulsed spray transfer)	45
I.9.5.	Avantages et inconvénients des modes de transfert	47
I.10.	Modes 2T et 4T en soudage MIG/MAG	47
I.11.1.	Mode 2T (2 touches)	48
I.11.2.	Mode 4T (4 touches)	49
I.11.3.	Fonctionnement des modes 2T et 4T en soudage MIG/MAG	50
I.11.4.	Détails du mode 2T en MIG/MAG	50
I.11.5.	Détails du mode 4T en soudage MIG/MAG	51
I.11.	Cycle de soudage sur un générateur MIG/MAG	51
I.11.1.	Phases du cycle sur un générateur MIG/MAG	52
I.11.1.1.	Pré gaz	52
I.11.1.3.	Amorçage de l'arc	52
I.11.1.4.	Soudage (arc établi)	53
I.11.1.5.	Extinction de l'arc (fin de cordon)	53
I.11.1.6.	Postgaz	54

I.11.2. Facteur de marche (Duty Cycle)	54
I.12. Positions de soudage	55
I.13. Équipements de protection individuelle	56
Chapitre II: Equipements de soudage MIG/MAG	
II.1. Introduction	58
II.2. Générateurs de soudage MIG/MAG.....	59
II.3. Système de dévidage	60
II.3.1. Types de moteurs de dévidage.....	61
II.3.1.1. Types de galets de dévidage.....	61
II.4. Torches de soudage MIG/MAG	62
II.5. Choix de la gaine guide-fil de soudage	64
II.6. Types de buses de torche de soudage MIG/MAG	65
II.6.1. Matériaux de fabrication des buses de soudage MIG/MAG.....	66
II.6.2. Facteurs influençant le choix du diamètre de buse en soudage MIG/MAG	67
II.6.2.1. Épaisseur de la pièce à souder.....	67
II.6.2.2. Diamètre du fil-électrode	67
II.6.2.3. Intensité du courant de soudage	68
II.6.2.4. Débit de gaz de protection.....	69
II.6.2.5. Nature du gaz de protection	69
II.6.2.6. Position de soudage.....	69
II.6.2.7. Nature du matériau de base	70
II.6.2.8. Adaptation des buses aux conditions de soudage	70
II.7. Embout contact (Contact tip).....	70
II.8. Fils-électrodes en soudage MIG/MAG	71
II.8.2. Différents types de fils-électrodes en soudage MIG/MAG	72
II.8.2.5. Fil plein	72

II.8.2.6.	Fil fourré.....	72
II.8.2.7.	Fil fourré auto-protégé	73
II.8.2.8.	Fil aluminium.....	73
II.8.2.9.	Fil inoxydable	74
II.8.3.	Précautions d'utilisation des fils-électrodes en soudage MIG/MAG	74
II.8.4.	Précautions d'utilisation des fils de soudage	74
II.9.	Rôle des gaz de protection	74
II.9.2.	Modes d'utilisation du gaz de protection.....	75
II.9.2.5.	Protection primaire (protéger le bain de fusion)	75
II.9.2.6.	Protection envers (protection de la racine de la soudure)	76
II.9.2.7.	Protection secondaire (post gaz)	76
II.9.3.	Choix des gaz selon l'application.....	77
II.9.4.	Alimentation en gaz de protection	79
Chapitre III : Module développé		
III.1.	Introduction	81
III.2.	Présentation du logiciel	81
III.3	Principales fonctions	81
III.4.	Présentation du module	82
III.4.1.	Fenêtre de présentation de l'application.....	82
III.4.2.	Fenêtre de connexion à l'application.....	83
III.4.3.	Fenêtre principale de l'application	83
III.5.	Description de l'application.....	84
III.5.1.	Cadre de configuration.....	84
III.5.2.	Cadre des résultats de soudage	85
III.5.3.	Cadre des commandes rapides	86
III.6.	Fonctionnement de l'application	87

III.6.1. Calculateur principal	87
III.6.1.1. Exemple de calcul.....	88
III.6.1.2. Informations incorrectes	95
III.6.1.3. Suppression des informations	96
III.6.2. Paramètres rapides	96
III.6.2.1. Métal d'apport et gaz de protection (mêmes matériaux).....	97
III.6.2.2. Métal d'apport et gaz de protection (matériaux différents).....	99
III.6.2.3. Débit de gaz	101
III.6.2.4. Diamètre du fil.....	102
III.6.2.5. Tension (mêmes matériaux)	103
III.6.2.6. Tension (matériaux différents)	105
III.6.2.7. Vitesse de déplacement.....	106
III.6.2.8. Polarité.....	107
III.6.2.9. Nombre de passes	109
III.6.2.10. Distance de la pointe de contact à la pièce	110
III.6.2.11. Température de préchauffage	111
III.7. Explication du cadre des commandes rapides.....	113
III.7.1. Fichiers machine	113
III.7.2. Informations du document	114
III.7.3. Enregistrement du rapport de soudage.....	116
III.7.4. Fermeture de l'application.....	117
Conclusion générale et perspectives	121
WEBOGRAPHIE.....	122
BIBLIOGRAPHIE	126

Liste des figures

Figure I. 1. Taux d'utilisation des différentes techniques de soudage	24
Figure I. 2. Soudage par procédé MIG/MAG	25
Figure I. 3. Schéma de principe du procédé de soudage MIG/MAG	26
Figure I. 4. Principaux paramètres de réglage du poste à souder	29
Figure I. 5. Polarités en courant continu en soudage	32
Figure I. 6. Principe du courant pulsé et du transfert des gouttelettes en soudage	33
Figure I. 7. Forme du courant alternatif (AC)	34
Figure I. 8. Influence de la tension sur la forme du cordon de soudure	35
Figure I. 9. Influence de la vitesse de soudage sur la qualité du cordon	36
Figure I. 10. Influence de la vitesse de dévidage du fil sur la pénétration	37
Figure I. 11. Structure et composition du fil de soudage	39
Figure I. 12. Influence de la distance torche-pièce sur les paramètres de soudage	39
Figure I. 13. L'angle de la torche	40
Figure I. 14. Cartographie des régimes de transfert	41
Figure I. 15. Domaine de paramètres du transfert par court-circuit	42
Figure I. 16. Évolution de la tension, du courant et du transfert des gouttelettes au cours du cycle de court-circuit	42
Figure I. 17. Domaine des paramètres du transfert globulaire	43
Figure I. 18. Évolution du mode de transfert globulaire	44
Figure I. 19. Domaine des paramètres du transfert par pulvérisation axiale	44
Figure I. 20. Transfert des gouttelettes et stabilité du courant pendant le cycle de soudage en spray arc	45
Figure I. 21. Domaine des paramètres du transfert pulsé	46
Figure I. 22. Transfert des gouttelettes et évolution du courant pulsé en fonction du temps	46
Figure I. 23. Séquence des phases de soudage en mode 2T	48

Figure I. 24. Séquence des phases de soudage en mode 4T	49
Figure I. 25. Positions de soudage	55
Figure I. 26. Équipements de protection individuelle	56
Figure II. 27. Schéma explicatif du procédé MIG/MAG	58
Figure II. 28. Poste de soudage MIG/MAG.	60
Figure II. 29. Système de dévidage du fil électrode	60
Figure II. 30. Types de galets d'entraînement	61
Figure II. 31. Torche de soudage MIG/MAG.....	62
Figure II. 32. Composants d'une torche de soudage MIG/MAG	62
Figure II. 33. Comparaison des systèmes d'acheminement du fil Push et Push-Pull	63
Figure II. 34. Unité de refroidissement du poste de soudage MIG/MAG	64
Figure II. 35. Gaine guide-fil	65
Figure II. 36. Formes et types de buses de torche MIG/MAG	65
Figure II. 37. Embouts de contact.....	71
Figure II. 38. Bobin de fil plein.....	72
Figure II. 39. Bobine de fil fourré	73
Figure II. 40. Bobine de fil électrode en aluminium	73
Figure II. 41. Bouteille de gaz de protection	75
Figure II. 42. Procédure de démarrage de l'arc	76
Figure II. 43. Évolution de la vitesse de dévidage lors de la fin de soudage	77
Figure II. 44. Types de gaz de protection utilisés en soudage MIG/MAG	78
Figure II. 45. Schéma explicatif d'alimentation du bouteille gaz	79
Figure III. 46. Interface du module développé.....	79
Figure III. 47. Fenêtre de connexion de l'application.....	83
Figure III. 48. Interface principale de l'application.	83
Figure III. 49. Panneau de sélection des paramètres d'entrée.....	84

Figure III. 50. Paramètres d'entrée.....	85
Figure III. 51. Panneau d'affichage des paramètres de soudage.....	86
Figure III. 52. Panneau des commandes rapides	86
Figure III. 53. Calculateur principal.....	88
Figure III. 54. Liste de la norme de soudage.....	88
Figure III. 55. Liste de sélection du type de machine de soudage	88
Figure III. 56. Liste de sélection du matériau de base (Material 1)	89
Figure III. 57. Boîte de dialogue de sélection de la nuance du matériau	89
Figure III. 58. Champs de sélection de la catégorie et de la nuance du matériau	89
Figure III. 59. Liste des catégories de nuances pour l'acier	90
Figure III. 60. Liste des nuances d'acier de construction	90
Figure III. 61. Interface sans affichage de la nuance.....	90
Figure III. 62. Sélection du type de soudage	90
Figure III. 63. Liste de sélection du deuxième matériau	91
Figure III. 64. Champ du deuxième matériau désactivé.....	91
Figure III. 65. Liste déroulante pour choisir l'épaisseur de la pièce à souder.....	92
Figure III. 66. Liste de sélection du type de métal d'apport	92
Figure III. 67. Liste de sélection du nom du métal d'apport.....	92
Figure III. 68. Sélection du diamètre de fil avec suggestAion automatique	92
Figure III. 69. Liste déroulante du gaz de protection	93
Figure III. 70. Sélection de la position de soudage	93
Figure III. 71. Sélection du type de joint.....	93
Figure III. 72. Affichage des résultats des paramètres de soudage	94
Figure III.73. Message d'erreur	95
Figure III. 74. Liste des champs obligatoires affichée dans le rapport d'avertissement.....	95
Figure III. 75. Réinitialisation des champs de saisie via le bouton clear	96

Figure III. 76. Fenêtre paramètres rapides	96
Figure III. 77. Paramètres disponibles dans paramètres rapides	97
Figure III. 78. Interface de calcul du métal d'apport et du gaz de protection (même matériau)	97
Figure III. 79. Affichage des recommandations du métal d'apport après sélection du matériau	98
Figure III. 80. Boîte de dialogue de confirmation de la catégorie de nuance	98
Figure III. 81 . Sélection du type de métal d'apport pour filtrer les résultats	99
Figure III. 82 . Résultats filtrés par type de fil	99
Figure III. 83. Interface de sélection du métal d'apport pour le soudage de matériaux dissimilaires	100
Figure III. 84. Résultats du métal d'apport et du gaz pour le soudage dissimilaire.....	100
Figure III. 85. Interface de calcul du débit de gaz.....	101
Figure III. 86. Résultat du débit de gaz de base selon.....	101
Figure III. 87. Résultat du débit de gaz ajusté selon le type de gaz de protection sélectionné	102
Figure III. 88. Interface de recommandation du diamètre de fil selon l'épaisseur	102
Figure III. 89. Résultat de la recommandation du diamètre de fil.....	103
Figure III. 90. Interface de calcul de la tension pour un matériau identique.....	103
Figure III. 91. Résultats de la tension calculée.....	104
Figure III. 92. Variation des résultats de tension selon le type de métal d'apport sélectionné.....	104
Figure III. 93. Interface de calcul de la tension pour le soudage de matériaux dissimilaires	105
Figure III. 94. Résultats de tension pour soudage dissimilaire	105
Figure III. 95. Interface de calcul de la vitesse de soudage.....	106
Figure III. 96. Résultats de la vitesse de soudage	106
Figure III. 97. Influence du matériau et de la position de soudage sur la vitesse de soudage.....	107
Figure III. 98. Interface de recommandation de la polarité de soudage.....	107
Figure III. 99. Résultats de la polarité recommandée selon le type de métal d'apport.....	108
Figure III. 100. Interface de calcul du résultat de la polarité	109

Figure III. 101.	Interface de calcul du nombre de passes de soudage	109
Figure III. 102.	Résultat du nombre de passes recommandé.....	110
Figure III. 103.	Interface de calcul de la distance bec-pièce	110
Figure III. 104.	Résultats de la distance bec-pièce.....	111
Figure III. 105.	Interface de calcul de la température de préchauffage.....	111
Figure III. 106.	Formulaire de calcul de la température de préchauffage par (Ceq).....	112
Figure III. 107.	Tableau de préchauffage pour les métaux non ferreux	112
Figure III. 108.	Résultats de préchauffage	113
Figure III. 109.	Fenêtre des fiches techniques des machines	113
Figure III. 110.	Fiche technique PDF d'une machine de soudage (MAXI 405-505)	114
Figure III. 111.	Fenêtre Document Information.....	114
Figure III. 112.	Nombre de passes de soudage selon l'épaisseur	115
Figure III. 113.	Guide des gaz de soudage MIG/MAG.....	115
Figure III. 114.	Sauvegarde du rapport de soudage	116
Figure III. 115.	Dossier de sauvegarde des rapports de soudage	116
Figure III. 116.	Message d'avertissement aucun rapport à sauvegarder.....	117

Liste des tableaux

Tableau I.1. Diamètre du fil électrode selon l'épaisseur du métal de base et de l'application	38
Tableau I. 2. Comparaison des techniques de soudage en Poussée et en Traînage.....	40
Tableau I. 3. Comparaison des modes de transfert en soudage MIG/MAG.....	47
Tableau I. 4. Comparaison entre les modes 2T et 4T.	50
Tableau II.5. Comparaison des matériaux de buses pour le soudage MIG/MAG.....	66
Tableau II. 6. Sélection du diamètre de la buse en fonction de l'épaisseur de la pièce	67
Tableau II. 7. Correspondance entre le diamètre de la buse et le diamètre du fil	68
Tableau II. 8. Correspondance entre le diamètre de la buse et l'intensité de soudage.....	68
Tableau II. 9. Correspondance entre le diamètre de la buse et le débit du gaz de protection.	69
Tableau II. 10. Comparatif des gaz de protection en soudage MIG/MAG	78
Tableau III.11. Traduit les mots des Paramètres d'entrée.....	84
Tableau III.12. Traduction des mots du panneau des commandes rapides.....	87

Abréviations

MIG : Soudage sous gaz inerte métallique.

MAG : Soudage sous gaz actif métallique.

TIG : Soudage à l'arc avec électrode de tungstène sous atmosphère inerte.

MMA : Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée.

GMAW : Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil électrode fusible.

CAW : Soudage assisté par ordinateur.

HF : Système d'amorçage par haute fréquence.

DC : Courant électrique continu.

AC : Courant électrique alternatif.

DCEN : Courant continu avec électrode négative.

DCEP : Courant continu avec électrode positive.

2T : Commande du cycle de soudage par pression continue sur la gâchette.

4T : Commande du cycle de soudage par impulsion avec maintien automatique de l'arc.

AWS : Société Américaine de Soudage.

ISO : Organisation Internationale de Normalisation.

Ceq : Carbone Équivalent.

CTWD : la distance torche-pièce.

Introduction générale

Le soudage est un procédé essentiel dans de nombreux secteurs industriels tels que la construction métallique, l'industrie automobile, la construction navale et la fabrication mécanique. Il permet d'assembler de manière permanente des pièces métalliques tout en garantissant la résistance et la qualité des structures réalisées. Avec le développement des technologies industrielles, les procédés de soudage ont connu une évolution importante afin d'améliorer la productivité et la qualité des assemblages.

Parmi ces procédés, le soudage MIG/MAG est l'un des plus utilisés grâce à sa rapidité d'exécution, sa facilité d'automatisation et la qualité des soudures obtenues. Toutefois, la réussite de cette opération dépend fortement du choix et du réglage de plusieurs paramètres tels que l'intensité du courant, la tension d'arc, la vitesse d'avance du fil et le débit du gaz de protection. Un mauvais réglage de ces paramètres peut entraîner des défauts de soudage et affecter la qualité finale de l'assemblage.

Dans ce contexte, l'utilisation des outils informatiques constitue une solution efficace pour assister l'utilisateur dans le choix des paramètres appropriés.

La problématique de ce travail consiste donc à développer un module intégré dans un environnement de soudage assisté par ordinateur (CAW) permettant de calculer et de sélectionner les paramètres de soudage MIG/MAG de manière simple et fiable.

Afin de répondre à cette problématique, ce projet vise à concevoir et développer un module dédié au calcul et à l'aide au réglage des paramètres de soudage MIG/MAG. Pour cela, ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier présente les généralités sur le procédé MIG/MAG, la deuxième traite des équipements et des paramètres de soudage, tandis que le troisième décrit le développement du module réalisé et ses principales fonctionnalités.

Enfin, une conclusion générale clôture ce travail en présentant les principaux résultats obtenus et les perspectives futures.

Chapitre I

Généralités sur le soudage

MIG/MAG

I.1. Introduction

Le soudage est l'un des procédés d'assemblage les plus importants dans l'industrie.

Il permet l'assemblage permanent de deux ou plusieurs pièces, généralement en métal, par application de chaleur, de pression, ou des deux, avec ou sans ajout de métal. Il existe d'autres types de soudage que le soudage MAG et MIG.

Ce chapitre traite des paramètres de soudage MAG et MIG, des méthodes de contrôle de ces procédés et des différents facteurs qui influencent le résultat.

I.2. Historique

Les origines du soudage à l'arc sous protection gazeuse (GMAW) remontent aux premières décennies du XXe siècle.

Débuts (1920-1940)

Dans les années 1920, des ingénieurs ont commencé à expérimenter l'utilisation de gaz de protection pour isoler le bain de soudage de l'atmosphère environnante.

Ces premiers essais ont révélé le potentiel des gaz de protection pour améliorer la qualité des soudures, mais les limitations techniques et économiques de l'époque ont empêché leur application industrielle.

Les procédés de soudage GMAW et MAG ont été développés pendant la Seconde Guerre mondiale, notamment pour soutenir l'effort de guerre américain après l'attaque japonaise de Pearl Harbor le 7 décembre 1941.

L'introduction de ces procédés dans l'industrie navale, particulièrement pour la fabrication des navires militaires, a permis de substituer le rivetage traditionnel par une technique de soudage plus rapide et plus efficace. Le procédé MAG a notamment été conçu pour améliorer la productivité et diminuer les coûts liés au soudage des pièces de grande épaisseur.[1]

La naissance du soudage MIG (1948)

En 1948, des ingénieurs du (Battelle Memorial Institute), aux États-Unis, mirent au point le premier système opérationnel utilisant un fil électrique sous atmosphère d'argon pur.

Ce procédé, appelé MIG (Metal Inert Gas), fut initialement conçu pour le soudage des métaux non ferreux tels que l'aluminium et le magnésium, des matériaux particulièrement sensibles à l'oxydation.

La société (Air Reduction Company) breveta rapidement l'invention, ce qui permit sa commercialisation au début des années 1950.

L'acier et l'émergence du soudage MAG (1953)

Le principal obstacle au soudage MIG était son coût élevé, l'argon étant onéreux et inadapté au soudage des aciers courants.

C'est pourquoi, en 1953, des chercheurs soviétiques, notamment (K.V. Lyubovsky) et (N.M. Novoshilov), proposèrent d'utiliser le dioxyde de carbone (CO₂) comme gaz de protection actif pour le soudage de l'acier au carbone.

Cette innovation a conduit au développement du soudage MAG (métal sous protection gazeuse), nettement moins coûteux et parfaitement adapté aux exigences de la production industrielle à grande échelle.

Normalisation et industrialisation (1960-1980)

Durant cette période, le soudage MIG/MAG a connu une croissance remarquable, grâce à des progrès simultanés dans trois domaines complémentaires :

La conception des générateurs à courant continu, les dévidoirs à vitesse variable fiables et l'amélioration des mélanges gazeux.

L'industrie automobile a été parmi les premières à adopter ces procédés, compte tenu de leur productivité élevée et de leur aptitude à l'automatisation.

Des entreprises telles que Lincoln Electric et ESAB ont joué un rôle de premier plan dans la normalisation des équipements et la formation des soudeurs.

Évolutions contemporaines (depuis 1980)

À partir des années 1980, l'introduction de l'électronique de puissance dans les alimentations électriques a révolutionné les possibilités du soudage.

Les générateurs à onduleur ont permis un contrôle précis et dynamique de l'arc électrique, ouvrant la voie à des techniques de soudage avancées telles que le soudage MIG pulsé et le transfert de métal à froid (CMT), qui réduisent considérablement la dispersion des étincelles et les émissions de chaleur.

La figure I.1 illustre le taux d'utilisation des différents procédés de soudage en Europe de l'Ouest, entre 1975 et 2000 :

- MIG/MAG (fils pleins et fils fourrés inclus) ;
- MMA (Manual Metal Arc welding) ;
- SAW (Submerged Arc welding) ;

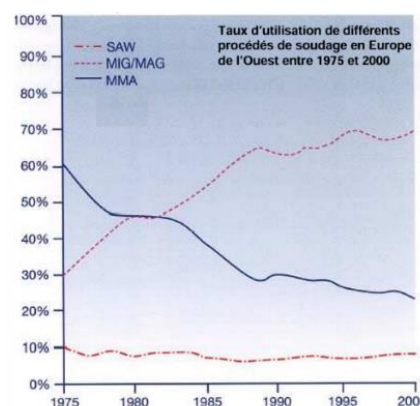


Figure I. 1. Taux d'utilisation des différentes techniques de soudage [2]

Aujourd'hui, le soudage MIG/MAG est l'un des procédés de soudage les plus utilisés au monde en raison de son rapport coût-efficacité et de sa facilité d'utilisation et il trouve de nombreuses applications dans la construction navale, l'aérospatiale, le génie civil et la fabrication additive métallique.

I.3. Définition du soudage MIG/MAG

Le soudage MIG/MAG est un procédé de soudage à l'arc électrique (l'arc électrique fait fondre le métal de base et le fil d'apport pour réaliser la soudure finale).

L'arc se forme entre la pièce à souder et le fil, qui sert à la fois d'électrode et de métal d'apport et le fil est alimenté par une bobine ou un tambour et passe par des galets d'entraînement qui le poussent à travers un guide-fil jusqu'à la torche.

L'énergie électrique nécessaire à l'arc est fournie par la source d'alimentation du poste de soudage à la buse de contact de la torche, où elle est transférée à l'électrode (fil).

Dans les procédés MIG/MAG, un gaz de protection est diffusé par une buse placée autour du tube-contact. Ce gaz, inerte en MIG et actif en MAG, assure la protection de l'arc électrique, du fil-électrode et du bain de fusion contre les effets néfastes de l'air ambiant. [3]

La différence entre les deux types de soudage réside dans la nature du gaz utilisé :

Soudage MIG (Métal Inert Gas)

- Utilise un gaz inerte, argon (Ar) ou hélium (He), qui ne réagit pas chimiquement avec le métal en fusion ;
- Principalement utilisé pour le soudage des métaux non ferreux (aluminium, cuivre, titane) ;

Soudage MAG (Métal Active Gas)

- Utilise un gaz actif tel que le CO_2 pur ou des mélanges Ar/CO_2 ou Ar/O_2 , qui participent aux réactions chimiques dans le bain de fusion ;
- Il est principalement utilisé pour le soudage des aciers ;

Grâce à sa productivité élevée et à sa facilité d'automatisation, le soudage MIG/MAG est largement utilisé pour le soudage de nombreux matériaux.

Ce procédé est particulièrement apprécié dans des secteurs industriels tels que la fabrication automobile, la construction métallique, la fabrication de structures et les travaux de maintenance, où la rapidité et l'efficacité sont essentielles.

La figure I.2 illustre le soudage par procédé MIG/MAG.



Figure I. 2. Soudage par procédé MIG/MAG

I.4. Principe du procédé MIG/MAG

Le principe de ce procédé repose sur la formation d'un arc électrique entre le fil-électrode, alimenté automatiquement à vitesse constante depuis une bobine, et la pièce à souder.

Un fil métallique traverse la torche et sert à la fois de conducteur électrique et de métal d'apport.

L'arc électrique se forme entre l'extrémité du fil et la pièce à souder, ce qui provoque la fusion du métal de base.

Le fil est alimenté à partir d'une bobine ou d'un fût, puis passe par des galets d'entraînement qui le poussent à travers une gaine guide-fil jusqu'à la torche.

La puissance électrique requise pour l'établissement de l'arc provient du générateur de soudage et est transmise au fil-électrode à travers l'embout de contact placé dans la torche. [4]

L'électrode, l'arc et le bain de fusion sont protégés par un gaz de protection, inerte ou actif, qui circule à travers une buse entourant la zone de soudage.

Ce gaz assure la protection de l'arc électrique ainsi que du bain de fusion contre l'atmosphère ambiante.

La stabilité de l'arc dépend de plusieurs facteurs :

- Le type de gaz de protection ;
- Le courant de soudage ;
- La tension d'arc ;
- Le métal d'apport ;
- Le diamètre du fil ;

La figure I.3 illustre le schéma de principe du procédé de soudage MIG/MAG.

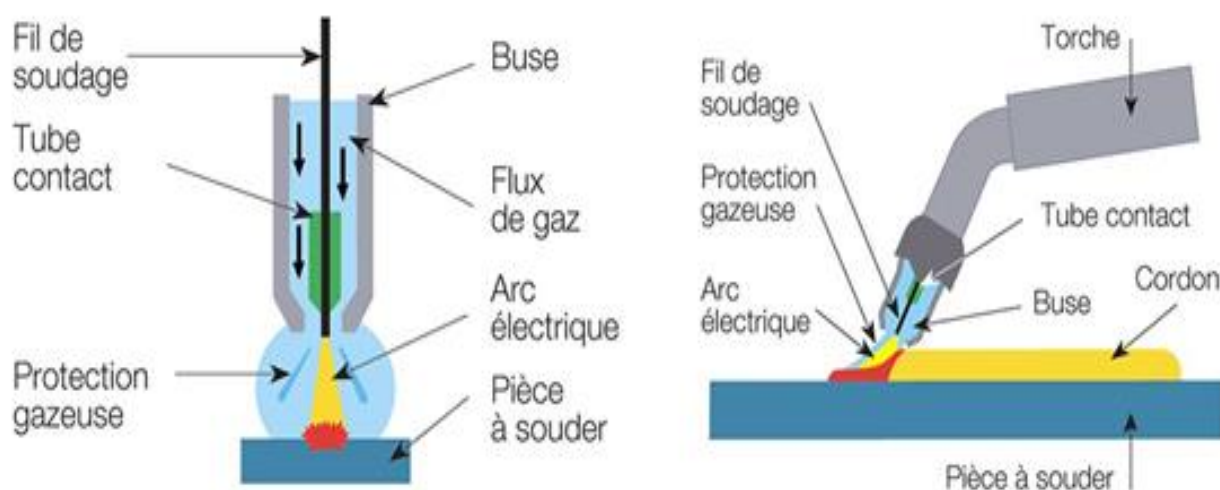


Figure I. 3. Schéma de principe du procédé de soudage MIG/MAG [5]

I.5. Avantages du procédé MIG/MAG

Le procédé MIG/MAG offre de nombreux avantages qui justifient son utilisation répandue dans l'industrie. Parmi ces avantages :

- Le soudage avec cette technique est facile à apprendre ;
- Haute performance et productivité élevée, avec des vitesses allant jusqu'à 100 cm/min ;
- Consommation d'énergie relativement faible ;
- Automatisation aisée ;
- Pas de remplacement continu des électrodes ;
- Absence de laitier, pas de nettoyage requis, gain de temps ;
- Soudage d'une large gamme d'alliages ferreux et non ferreux à faible coût ;
- Toutes positions : à plat, corniche, plafond, verticale ;
- Automatisation : semi-automatique ou robotisée ;
- Faible coût, consommables abordables ;
- Taux de dépôt élevé, supérieur aux procédés MMA et TIG ;
- Faible apport de chaleur, évitant la déformation des pièces fines ;
- Réduction des émissions de fumées grâce aux mélanges gazeux à base d'argon ;

I.6. Inconvénients du procédé MIG/MAG

Malgré ses avantages, ce procédé présente certaines limitations :

- Possibilités d'utilisation en extérieur limitées ; sensibilité aux courants d'air, le gaz de protection devant être protégé ;
- Le gaz de protection peut se dégrader en extérieur, entraînant des défauts de porosité ;
- Équipement coûteux et complexe ; plus onéreux que le soudage à l'arc avec électrode enrobée (MMA) ;
- L'accès au métal de base peut s'avérer plus complexe dans certaines applications, notamment à cause des dimensions relativement importantes de la torche de soudage ;
- Le motif de transfert sphérique produit des projections métalliques susceptibles d'endommager la pièce ;
- Lors des opérations de soudage MIG/MAG, le niveau de bruit peut atteindre 90 à 95 dB(A). Étant donné que le seuil de risque auditif est fixé à 85 dB(A), le port d'équipements de protection adaptés est recommandé pour préserver la santé de l'opérateur ; [6]

- Ce procédé produit des fumées dangereuses à proximité immédiate de la zone de soudage, qui doivent être extraites ;

I.7. Domaine d'application

Le soudage MIG/MAG est l'une des techniques de soudage les plus répandues dans l'industrie moderne.

Sa polyvalence, sa productivité élevée et son coût relativement abordable en font un procédé particulièrement performant.

Ce type de soudage permet d'obtenir des joints solides, homogènes et de haute qualité.

Grâce à son système semi-automatisé basé sur un fil-électrode continu et un gaz de protection, ce procédé assure un transfert stable du métal et un contrôle précis du bain de fusion, notamment en production en série.

Il est particulièrement adapté au soudage de matériaux d'épaisseurs comprises entre 1,5 mm et plusieurs centimètres ; pour les fortes épaisseurs, des passes multiples peuvent être nécessaires.

Adapté à l'ensemble des positions de soudage, ce procédé se distingue par son aptitude à satisfaire les besoins des secteurs industriels où la rapidité d'exécution et le rendement constituent des critères essentiels. [7]

Ce procédé permet le soudage d'une large gamme de matériaux, notamment l'acier doux, l'acier au carbone, l'acier faiblement allié, l'acier inoxydable, ainsi que certains métaux non ferreux comme l'aluminium et ses alliages.

Toutefois, le soudage des métaux revêtus, tels que les aciers galvanisés, entraîne une dégradation locale du revêtement et nécessite des précautions particulières en raison des émissions toxiques d'oxyde de zinc.

La qualité des soudures dépend fortement des paramètres opératoires (tension, intensité, vitesse d'alimentation du fil et débit de gaz) ainsi que des conditions environnementales, notamment la sensibilité au vent lors du soudage sous protection gazeuse.

Ce procédé est largement utilisé dans les entreprises publiques et privées ainsi que dans les petits ateliers, en raison de sa rapidité, de sa flexibilité et de la qualité des assemblages obtenus.

Il est utilisé dans de nombreux secteurs industriels, notamment l'industrie automobile, la construction navale, le génie civil et la métallurgie (machines-outils, équipements agricoles,

réservoirs et tuyauteries). Il s'étend également aux domaines ferroviaire, électronique et médical, ainsi qu'aux activités de maintenance et de production industrielle. [8]

I.8. Paramètres du procédé MIG/MAG

La maîtrise des paramètres de fonctionnement dans le soudage MIG/MAG est essentielle pour garantir une productivité élevée et une qualité optimale des assemblages.

La qualité du joint soudé obtenu par ce procédé dépend directement du réglage de plusieurs paramètres opératoires interdépendants, dont une mauvaise combinaison peut conduire à des défauts structurels tels que les porosités, le manque de fusion ou la fissuration.

Parmi les paramètres les plus importants, on retrouve : le courant de soudage, la tension, la vitesse de soudage, la vitesse de dévidage du fil, le gaz de protection, le diamètre du fil électrode, le métal d'apport, la distance torche-pièce (CTWD) ainsi que l'angle de la torche.

La figure I.4 illustre les principaux paramètres de réglage du poste à souder.

- 01- Choix du type de soudage
- 02- Système de fonctionnement de la torche
- 03- Temps de décroissance du courant
- 04- Temps de post-gaz de protection
- 05- Inductance
- 06- Tension
- 07- Vitesse d'alimentation du fil



Figure I. 4. Principaux paramètres de réglage du poste à souder

I.8.1. Courant de soudage

Le courant de soudage joue un rôle fondamental dans le procédé MIG/MAG.

Il détermine la quantité de chaleur produite par l'arc électrique et conditionne directement la pénétration du cordon ainsi que le taux de fusion du fil électrode.

En pratique, le courant est réglé de manière indirecte par l'ajustement de la vitesse de dévidage du fil. Pour un diamètre de fil donné, ces deux grandeurs sont liées par une relation quasi linéaire : lorsque l'intensité du courant augmente, la vitesse d'alimentation du fil augmente également, et inversement. [9]

Son influence se manifeste comme suit :

- Un courant trop faible peut provoquer une fusion insuffisante ainsi qu'une pénétration inadéquate du métal de base ;
- En revanche, un courant élevé augmente la profondeur de pénétration mais peut provoquer des projections excessives, une instabilité de l'arc, des risques de brûlure ainsi qu'une déformation thermique importante ;

Le courant influence également le mode de transfert du métal (court-circuit, globulaire, pulvérisation).

Il est mesuré en Ampères (A) et varie généralement entre 60 A et 500 A selon le diamètre du fil et l'épaisseur du métal de base.

La règle générale consiste à déterminer le courant de soudage en fonction de l'épaisseur de la pièce, avec une valeur indicative d'environ 50 A par millimètre pour les tôles fines.

Pour les épaisseurs plus importantes, ce rapport diminue progressivement jusqu'à 40 A/mm, voire 30 A/mm.

Ainsi, pour une tôle de 3 mm d'épaisseur, un réglage d'environ 150 A constitue un bon point de départ pour le soudage.[10]

I.8.1.1. Courant continu DC

Le soudage MIG/MAG fonctionne principalement en courant continu, où le flux de courant circule dans une seule direction tout au long du processus, assurant ainsi une stabilité élevée de l'arc.

Un arc électrique alimenté à une tension constante et créé sur un fil alimenté à une vitesse constante tend à se stabiliser naturellement, ce qui garantit une qualité de soudage optimale.

La flexibilité du procédé offre une certaine marge de tolérance dans le choix des paramètres de tension et de vitesse d'alimentation du fil, permettant ainsi d'obtenir un transfert du métal aussi bien en mode court-circuit (short-arc) qu'en mode de pulvérisation (spray-arc). [11]

I.8.1.1.1. Courant continu avec polarité inverse (DCEP)

Avec la polarité inverse, la torche et son câble sont connectés à la borne positive de la source d'alimentation, tandis que la pièce à souder est reliée à la borne négative.

Dans cette configuration, les électrons circulent de la pièce vers le fil-électrode, ce qui assure :

- Une bonne stabilité de l'arc ;
- Un excellent contrôle du bain de fusion ;
- Une pénétration optimale ;
- Un taux de projections réduit ;

Il s'agit de la configuration la plus couramment utilisée en soudage MIG/MAG, convenant à la majorité des matériaux métalliques tels que les aciers doux, les aciers inoxydables, l'aluminium et ses alliages, ainsi que le nickel, le cuivre et leurs alliages. [12]

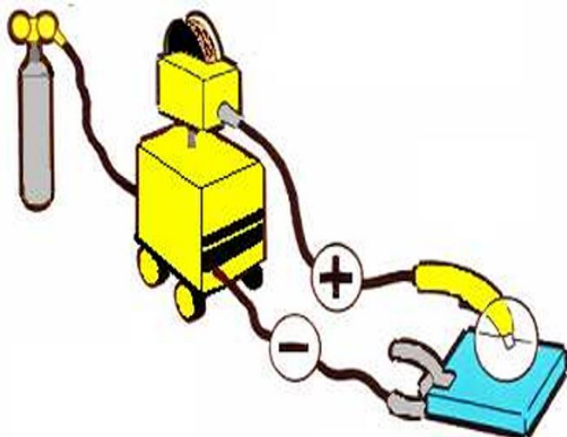
I.8.1.1.2. Courant continu avec polarité directe (DCEN)

Avec la polarité directe, la torche est connectée au pôle négatif et le matériel à souder au pôle positif de la source d'alimentation.

Cette configuration est exclusivement utilisée pour le soudage avec fil fourré sans apport de gaz externe (flux-cored ou self-shielded wire), la protection du bain de fusion étant assurée par le flux contenu dans l'âme du fil. [13]

La figure I.5 illustre les polarités en courant continu en soudage.

La polarité inversée est la plus couramment utilisée



Polarité directe

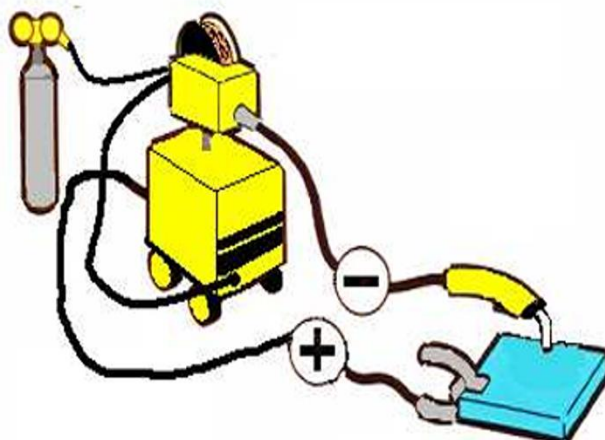


Figure I. 5. Polarités en courant continu en soudage [14]

I.8.1.2. Courant pulsé

Le courant pulsé est une variante du courant continu dans laquelle le courant n'est pas maintenu constant, mais modulé avec un train d'impulsions.

Ces impulsions ont pour objectif de forcer le détachement de gouttes de petites dimensions du fil-électrode, permettant ainsi d'obtenir les caractéristiques du transfert par pulvérisation (spray-arc), y compris avec des courants réduits.

L'apport thermique, les dimensions du bain de fusion et la pénétration sont similaires au mode spray-arc classique.

Ce procédé trouve ses principales applications avec :

- L'aluminium et ses alliages ;
- L'acier inoxydable ;
- Dans les cas où le procédé short-arc ne permettrait pas d'obtenir une qualité de soudage satisfaisante ;[15]

La figure I.6 illustre le principe du courant pulsé et du transfert des gouttelettes en soudage.

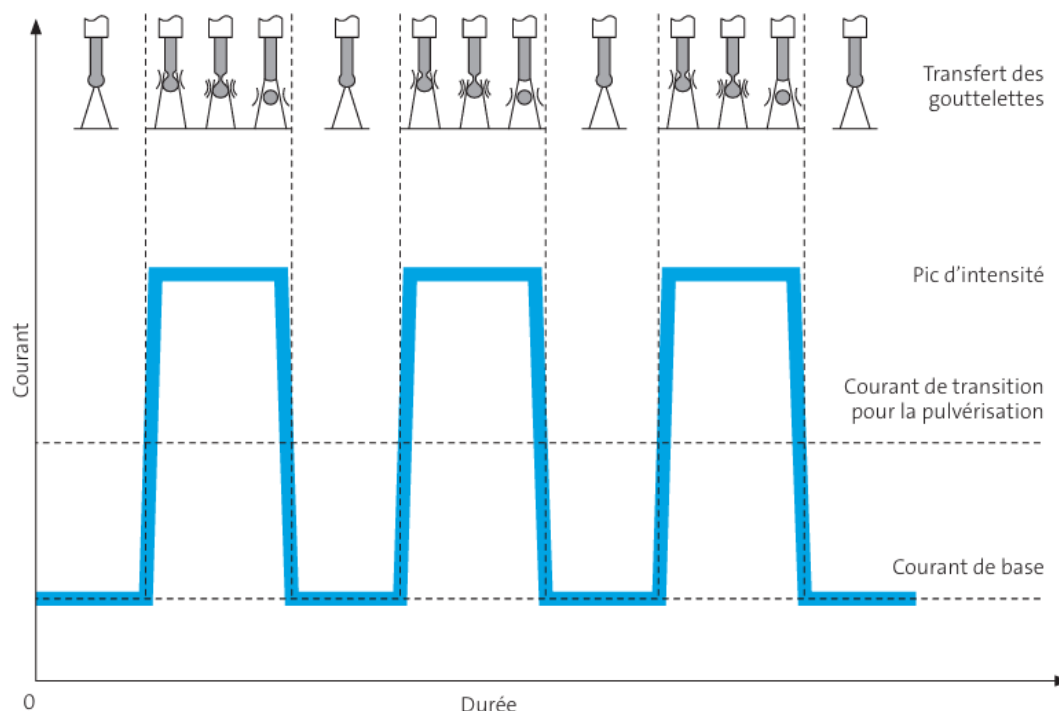


Figure I. 6. Principe du courant pulsé et du transfert des gouttelettes en soudage [16]

I.8.1.3. Double pulsed MIG/MAG

Le Double pulsed est une évolution du courant pulsé classique, il combine deux fréquences de pulsation afin d'obtenir un meilleur contrôle thermique et un aspect esthétique proche du soudage TIG.

Ce procédé est largement utilisé dans :

- L'industrie automobile ;
- Les constructions en aluminium ;

Les applications nécessitant une finition de haute qualité.

I.8.1.4. Courant alternatif AC

Bien que rarement utilisé en soudage MIG/MAG, le courant alternatif présente certains avantages spécifiques.

Le courant change périodiquement de direction, ce qui permet de réduire l'effet de soufflage magnétique (Arc Blow), un phénomène d'instabilité de l'arc causé par les champs magnétiques parasites, notamment lors du soudage de pièces fortement magnétisées.

Toutefois, en raison des difficultés liées au maintien de la stabilité de l'arc et au contrôle du bain de fusion, le courant alternatif demeure peu utilisé dans les applications courantes du procédé MIG/MAG, contrairement au soudage TIG où il est largement employé pour le soudage de l'aluminium. [17]

La figure I.7 illustre la forme du courant alternatif (AC).

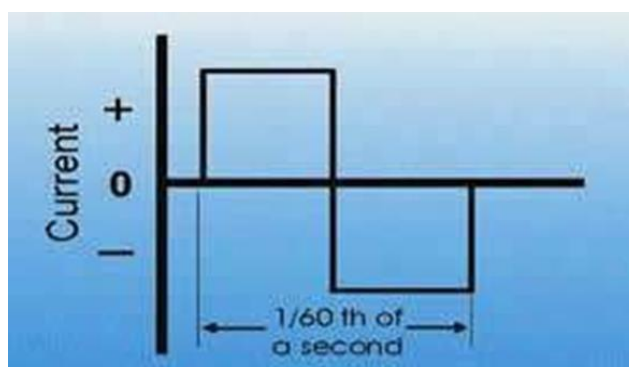


Figure I. 7. Forme du courant alternatif (AC) [18]

I.8.2. Tension de soudage

La tension d'arc est le second paramètre essentiel du réglage, la tension de soudage contrôle principalement la longueur de l'arc électrique.

Chaque diamètre de fil-électrode correspond à une plage de tension d'utilisation spécifique. De manière générale, l'augmentation du diamètre du fil entraîne une élévation de la tension minimale d'utilisation. [19]

Une tension trop faible produit un arc court, un cordon étroit et haut qui peut manquer de fusion sur les bords.

Si la tension est trop élevée, l'arc s'allonge, le cordon devient large et plat, mais le risque de brûlure sur matériaux fins augmente, accompagné de projections.

La tension est mesurée en volts (V) et doit être ajustée en cohérence avec le courant de soudage, selon la relation empirique : $U \approx 14 + 0,05 \times I$.

Pour un acier de moyenne épaisseur (environ 3 à 6 mm), la plage de tension recommandée se situe généralement entre 17 et 21 volts, en fonction de la vitesse d'alimentation du fil. [21]

Un mauvais réglage peut entraîner des défauts tels que les projections ou un cordon irrégulier.

La figure I.8 illustre l'influence de la tension sur la forme du cordon de soudure.

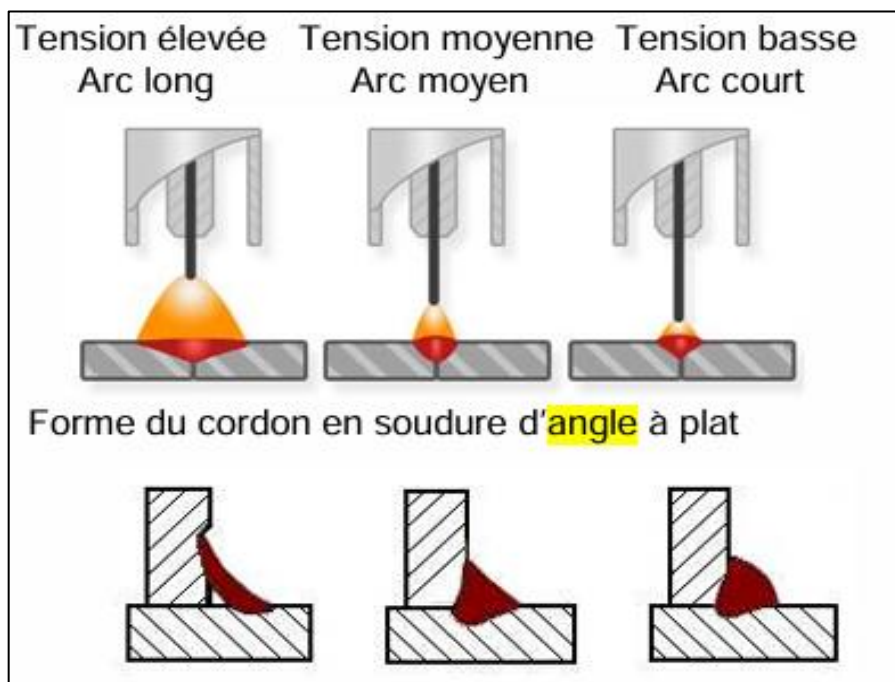


Figure I. 8. Influence de la tension sur la forme du cordon de soudure [20]

I.8.3. Vitesse de soudage

La vitesse de soudage correspond à la vitesse de déplacement de la torche le long du joint à assembler.

Une vitesse trop faible augmente l'apport thermique, provoquant un élargissement du bain de fusion et un risque de déformation de la pièce.

À l'inverse, une vitesse élevée réduit l'apport thermique, ce qui peut entraîner un manque de fusion.

La vitesse de soudage est exprimée en cm/min et intervient dans le calcul de l'énergie de soudage selon la formule : $E = (U \times I \times 60) / (1000 \times V_s)$.

Il est possible de souder des tôles d'une épaisseur de 0,5 mm à des vitesses pouvant atteindre 5 m/min, tout en garantissant un cordon de soudure régulier et de bonne qualité. [22]

La figure I.9 illustre l'influence de la vitesse de soudage sur la qualité du cordon.

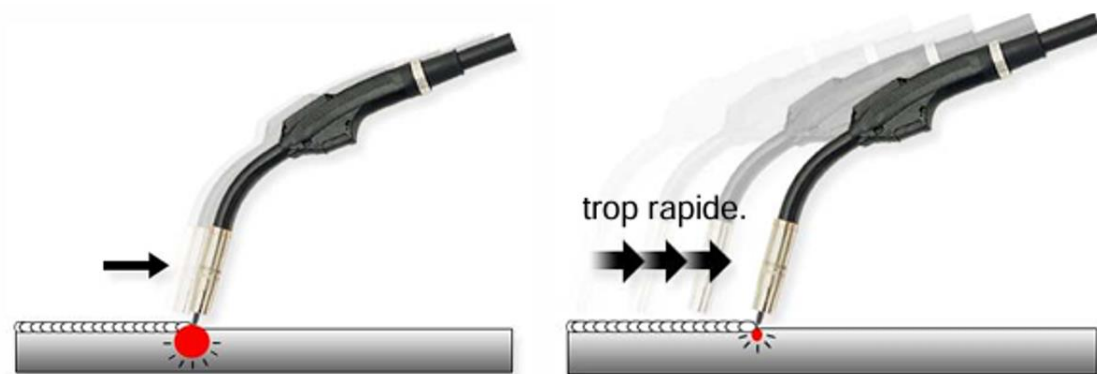


Figure I. 9. Influence de la vitesse de soudage sur la qualité du cordon [23]

I.8.4. Gaz de protection

Le gaz de protection joue un rôle multifonctionnel dans le procédé MIG/MAG : il joue un rôle essentiel dans la stabilité de l'arc, la qualité du bain de fusion et les propriétés mécaniques du joint et protège le bain de fusion contre la contamination atmosphérique.

Le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu (argon ou argon + hélium), contrairement au procédé MAG qui utilise un mélange d'argon et de dioxyde de carbone en proportions variables selon les métaux à souder.

Le gaz est injecté de manière continue au niveau de l'arc afin d'assurer une protection complète du métal en fusion contre l'atmosphère ambiante. [24]

Les gaz et mélanges les plus utilisés sont les suivants :

- Le CO_2 pur offre une bonne pénétration à faible coût, mais génère un arc instable et de nombreuses projections ;
- L'argon pur assure un arc très stable avec peu de projections, mais est réservé aux métaux non ferreux en raison de sa faible pénétration sur les aciers ;
- Le mélange Ar/CO_2 (75/25 ou 80/20) constitue le compromis le plus utilisé pour le soudage des aciers, associant la stabilité de l'arc apportée par l'argon à la pénétration du CO_2 ;
- Le mélange Ar/O_2 est préféré pour le soudage des aciers inoxydables ;
- Le débit de gaz est généralement réglé entre 10 et 20 L/min, en fonction du diamètre de la buse et des conditions environnementales ; [25]

I.8.5. Vitesse de dévidage du fil

La vitesse de dévidage du fil électrode, détermine la quantité de métal d'apport introduite dans le bain de fusion par unité de temps.

La vitesse de dévidage du fil est directement liée au courant de soudage une augmentation de la vitesse de dévidage entraîne une augmentation du courant.

La figure I.10 présente l'influence de la vitesse de dévidage du fil sur la pénétration.

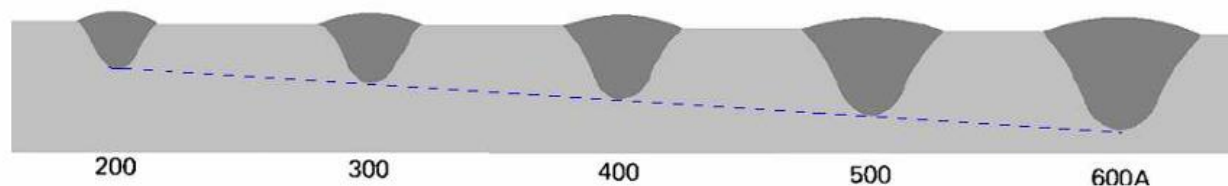


Figure I. 10. Influence de la vitesse de dévidage du fil sur la pénétration [26]

Ce paramètre est réglé sur le dévidoir et constitue le moyen principal d'ajustement du courant sur les postes MIG/MAG à tension constante.

Si la vitesse de fil est trop grande pour une tension donnée, le fil tape dans le bain de fusion.

Si la vitesse de dévidage est trop faible pour une tension donnée, cela provoque une remontée du fil dans la buse et une rentrée d'arc avec collage du fil dans le tube contact.

Pour déterminer la vitesse de dévidage en mètres par minute, il suffit de chronométrer la longueur de fil déroulée en une minute, pour un réglage donné du poste de soudage. [27]

Un mauvais réglage peut provoquer des instabilités de l'arc, des projections ou un mauvais transfert du métal.

I.8.6. Diamètre du fil électrode

Le diamètre du fil électrode conditionne la plage de courant utilisable, le taux de dépôt et la facilité de manipulation. Les diamètres normalisés les plus courants sont 0,6 mm, 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm et 1,6 mm.

Le choix du diamètre approprié dépend de l'épaisseur du métal de base, de la position de soudage et du niveau de courant requis. Plus le diamètre du fil est faible, plus le transfert du métal s'effectue de manière régulière et stable. [28]

Le tableau ci-dessous présente le diamètre du fil électrode en fonction de l'épaisseur du métal de base et de l'application.

Tableau I.1. Diamètre du fil électrode selon l'épaisseur du métal de base et de l'application. [29]

Diamètre (mm)	Application	Épaisseur (mm)
Ø 0,6	Carrosserie automobile	1-2
Ø 0,8	Faibles épaisseurs	2-6
Ø 1,0	Usage général	5-8
Ø 1,2	Épaisseurs moyennes à fortes	8-12
Ø 1,6	Fortes épaisseurs	A partir de 12

I.8.7. Métal d'apport

Dans le procédé MIG/MAG, le fil électrode constitue le métal d'apport.

Son choix doit être compatible avec celle du métal de base afin de garantir des propriétés mécaniques et métallurgiques satisfaisantes au niveau du joint soudé.

Les fils d'apport sont classifiés selon des normes internationales telles que la norme AWS A5.18 pour les aciers non alliés et la norme ISO 14341 pour les aciers de construction.

Les fils d'apport sont généralement en acier non allié, acier inoxydable ou aluminium selon l'application.

Les fils massifs sont utilisés de 0,6 à 2,4 mm et même jusqu'à 3,2 mm de diamètre.

L'enrobage au cuivre (quelques microns d'épaisseur) protège le fil contre l'oxydation et diminue la résistance électrique.

Les fils contenant du silicium (0,3 à 1,2 %) ou du manganèse (0,9 à 1,3 %) possèdent des propriétés désoxydantes en présence de CO₂ ou d'O₂. De manière générale, l'augmentation de ces teneurs améliore la capacité du fil à adhérer à des surfaces oxydées, rouillées ou légèrement contaminées. [30]

La propreté de surface du fil est également un facteur important : toute contamination par des huiles, graisses ou oxydes peut engendrer des défauts de porosité.

La figure I.11 illustre la structure et la composition du fil de soudage.

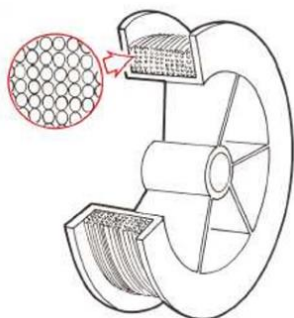


Figure I. 11. Structure et composition du fil de soudage [31]

I.8.8. Distance torche-pièce

La distance torche-pièce, désignée par l'acronyme CTWD (Contact Tip to Work Distance), correspond à la distance entre l'extrémité du tube contact et la surface de la pièce à souder.

Ce paramètre influence directement la résistance électrique du fil dépassant du tube contact et, par conséquent, le courant de soudage et la stabilité de l'arc.

Une distance trop grande augmente la résistance du dépassement du fil, entraîne une chute du courant, réduit la pénétration et dégrade la protection gazeuse.

L'augmentation du CTWD (Contact Tip to Work Distance) entraîne une diminution du courant de soudage, ce qui se traduit par une réduction du taux de fusion du fil. [32]

Ce phénomène s'explique par la loi d'Ohm ($V = IR$) : l'augmentation du CTWD accroît la longueur effective du conducteur, ce qui entraîne une augmentation de la résistance électrique. À tension constante, cette hausse de résistance provoque une diminution de l'intensité du courant.). [34]

La figure I.12 illustre l'influence de la distance torche-pièce sur les paramètres de soudage.

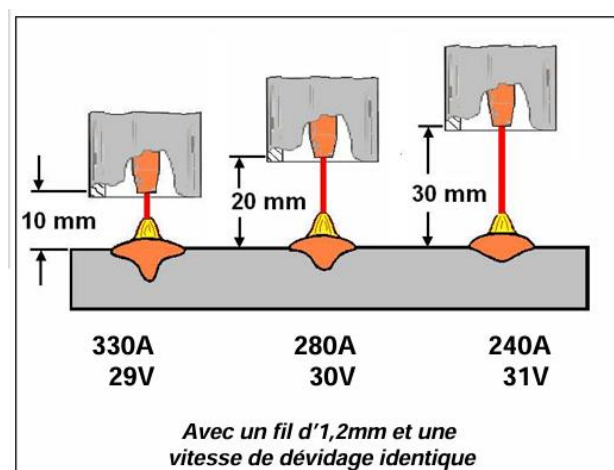


Figure I. 12. Influence de la distance torche-pièce sur les paramètres de soudage [33]

I.8.9. Angle de la torche

L'angle de la torche est un paramètre géométrique essentiel qui se décompose en deux composantes.

I.8.9.1. Angle de travail

Angle entre la torche et la pièce dans un plan perpendiculaire à la direction de soudage (Figure I.13). L'angle de travail est généralement maintenu à 90° pour les soudures en bout, et à 45° pour les soudures d'angle.

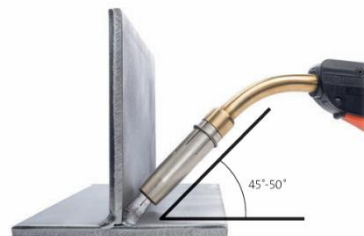


Figure I. 13. L'angle de la torche [35]

Des écarts importants par rapport à ces valeurs peuvent provoquer un manque de fusion latéral et une mauvaise répartition du gaz de protection.

I.8.9.2. Angle de déplacement

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre les techniques de soudage en poussée et en traînage.

Tableau I. 2. Comparaison des techniques de soudage en Poussée et en Traînage.

Critère	Technique en Poussée	Technique en Traînage
Inclinaison de la torche	Vers l'avant (dans le sens d'avance)	Vers l'arrière (contre le sens d'avance)
Angle recommandé	5° à 15°	5° à 15°
Pénétration	Faible	Profonde
Largeur du cordon	Large et plat	Étroit et bombé
Visibilité du bain	Bonne	Réduite
Projections	Peu nombreuses	Plus nombreuses
Application	Tôles fines	Fortes épaisseurs
Recommandation MIG/MAG	Généralement recommandée	Cas spécifiques

En MIG/MAG, la technique en poussée (torche inclinée dans le sens d'avance) est généralement recommandée car elle offre une meilleure visibilité du bain et moins de projections.

I.9. Modes de transfert du soudage MIG/MAG

En soudage MIG/MAG, le transport du métal d'apport de l'électrode au bain de fusion est un facteur crucial qui influe sur la stabilité de l'arc, la qualité du cordon de soudure et les projections de métal.

Ce transport dépend principalement du courant de soudage, de la tension, du diamètre du fil et du gaz de protection.

Le soudage MIG/MAG présente quatre modes de transport du métal au sein de l'arc.

La figure I.14 illustre la cartographie des régimes de transfert.

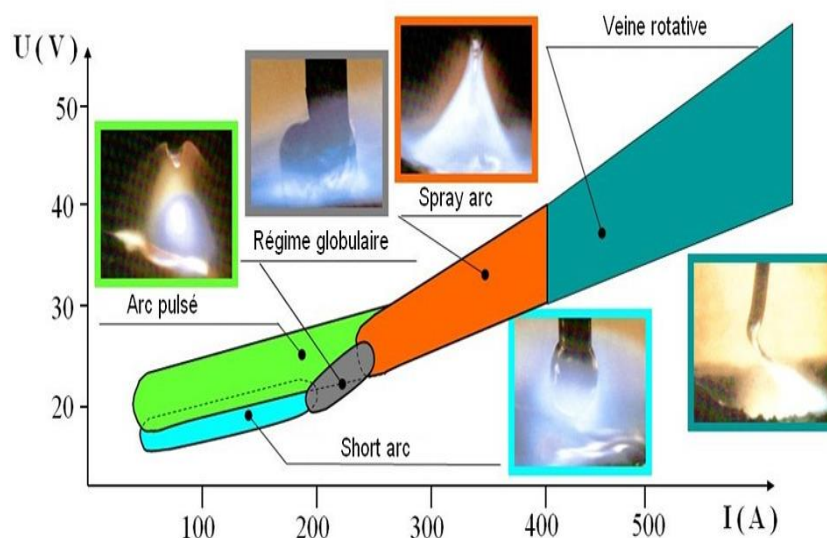


Figure I. 14. Cartographie des régimes de transfert [36]

I.9.1. Transfert par court-circuit (short arc)

Dans ce mode (Transfert par Court-Circuit Figure I.15), le fil électrode entre périodiquement en contact avec le bain de fusion, provoquant des courts-circuits successifs de 20 à 200 fois par seconde et le métal est transféré sous forme de petites gouttelettes à faible énergie.

Ce mode est très populaire car il requiert peu de voltage et moins de fil-électrode, ce qui implique moins de chaleur pouvant déformer les pièces.

Un de ses avantages est qu'il permet le soudage dans toutes les positions.

Cependant, il est déconseillé pour des aciers de forte épaisseur car ce transfert à bas voltage risque de provoquer des défauts majeurs.

Ce mode est particulièrement adapté au soudage des tôles fines inférieures à 5 mm, car son faible apport thermique limite les déformations.

Il est utilisable dans toutes les positions de soudage, y compris verticale et en plafond.

Cependant, il est déconseillé pour les fortes épaisseurs en raison du risque de manque de fusion.

Le gaz le plus utilisé pour ce mode est un mélange de 75 % d'argon et 25 % de CO_2 .

Ce procédé est utilisé dans divers domaines industriels, notamment l'industrie automobile, la chaudronnerie légère et la fabrication de tuyauteries. [37]

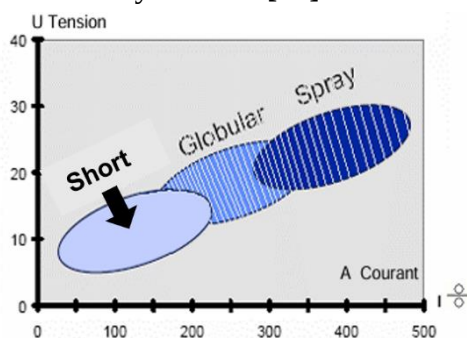


Figure I. 15. Domaine de paramètres du transfert par court-circuit [38]

Une goutte de métal en fusion se forme progressivement à l'extrémité de l'électrode-fil, puis augmente en volume.

Lorsque cette goutte devient suffisamment grande, elle entre en contact avec le bain de fusion, provoquant ainsi un court-circuit de l'arc et une augmentation de l'intensité du courant électrique.

Ce phénomène se poursuit jusqu'au détachement de la goutte, ce qui permet la reformation de l'arc. Cette variation de l'intensité du courant peut engendrer des projections de métal fondu.

La figure I.16 illustre l'évolution de la tension, du courant électrique ainsi que du transfert des gouttelettes au cours du cycle de soudage en court-circuit.

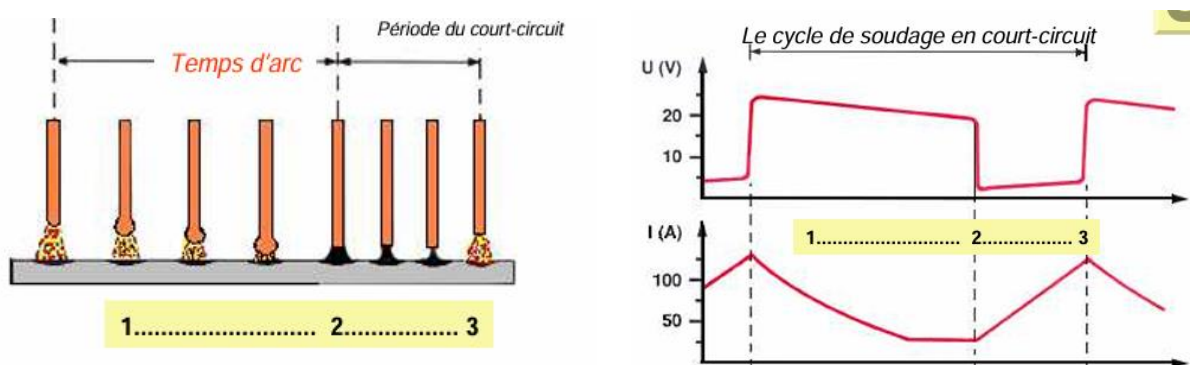


Figure I. 16. Évolution de la tension, du courant et du transfert des gouttelettes au cours du cycle de court-circuit [39]

I.9.2. Transfert globulaire (globular transfer)

Le transfert globulaire est un mode transitoire où le métal est transféré sous forme de grosses gouttes irrégulières, plus grandes que le diamètre du fil électrode.

Le transfert est erratique, tantôt par court-circuit, tantôt en vol libre, parfois à côté du bain de fusion.

Ce mode fonctionne avec une intensité de 180 à 260 A et une tension de 23 à 28 V.

Il génère beaucoup de projections et sa pénétration est moins prononcée qu'en court-circuit.

C'est le mode le moins utilisé en production.

Ce phénomène apparaît généralement lorsque les paramètres de soudage ne sont pas correctement réglés, en particulier en présence de gaz de protection à forte teneur en CO₂. [40]

La figure I.16 illustre le domaine des paramètres du transfert globulaire.

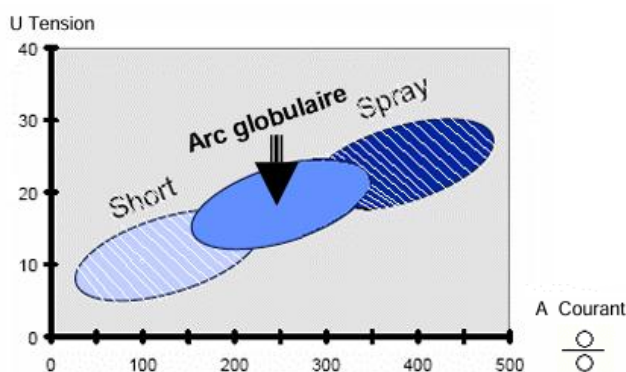


Figure I. 17. Domaine des paramètres du transfert globulaire [41]

Le cycle de soudage en transfert globulaire se déroule selon plusieurs étapes successives :

Une goutte de métal en fusion se forme à l'extrémité du fil-électrode puis augmente progressivement en volume jusqu'à dépasser le diamètre du fil.

Le transfert de cette goutte vers le bain de fusion peut s'effectuer de manière instable, soit par court-circuit, soit en vol libre à travers l'arc électrique.

Une fois la goutte détachée, l'arc se reforme immédiatement, ce qui permet le démarrage d'un nouveau cycle de transfert.

Ce mode se caractérise par une instabilité de l'arc et une forte production de projections (spatter), ce qui peut affecter la qualité du cordon de soudure.

La figure I.18 illustre l'évolution du mode de transfert globulaire.

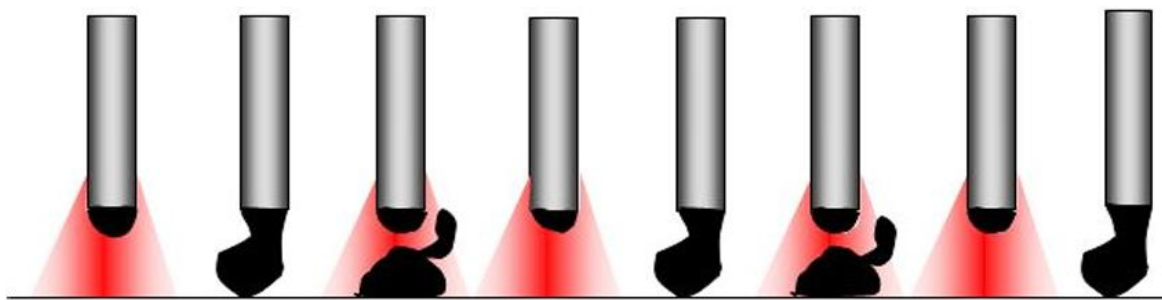


Figure I. 18. Évolution du mode de transfert globulaire [42]

I.9.3. Transfert par pulvérisation axiale (spray transfer)

Dans ce mode, de très fines gouttelettes de métal fondu sont projetées axialement à travers l'arc sous l'effet des forces électromagnétiques, sans contact entre le fil et le bain de fusion.

Ce mode fonctionne avec une intensité supérieure à 260 A et une tension de 24 à 33 V.

Ce mode nécessite l'utilisation d'un gaz de protection riche en argon, tandis que le CO₂ pur est généralement déconseillé pour ce type de transfert. [43]

Il offre une excellente stabilité de l'arc, peu de projections et un taux de dépôt élevé.

Cependant, il est limité aux positions à plat et aux pièces épaisses supérieures à 6,4 mm en raison de son apport thermique élevé.

Ce procédé est largement utilisé dans la construction navale, la charpente métallique et les pipelines.

La figure I.19 illustre le domaine des paramètres du transfert par pulvérisation axiale.

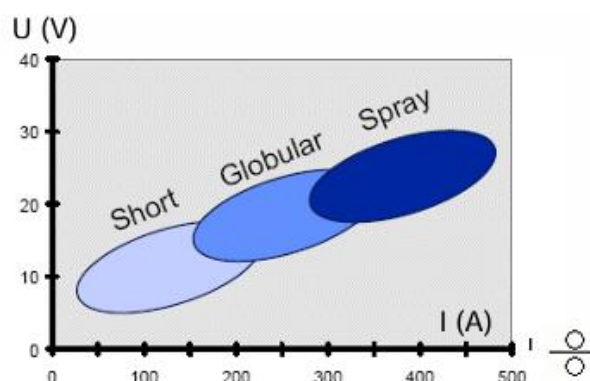


Figure I. 19. Domaine des paramètres du transfert par pulvérisation axiale [44]

Le cycle de soudage en pulvérisation axiale se caractérise par un transfert continu et régulier du métal d'apport sous forme de très fines gouttelettes. Ce transfert s'effectue axialement à travers l'arc électrique, sans contact entre le fil-électrode et le bain de fusion.

Dans ce mode, un réglage approprié de la vitesse de dévidage (courant) et de la tension de l'arc permet d'obtenir une projection stable du métal fondu sous forme de particules fines, évitant ainsi tout court-circuit pendant le transfert.

Le cycle se distingue par une grande stabilité de l'arc, un dépôt régulier et une très faible présence de projections, ce qui améliore la qualité du cordon de soudure.

La figure I.20 illustre Transfert des gouttelettes et stabilité du courant pendant le cycle de soudage en spray arc.

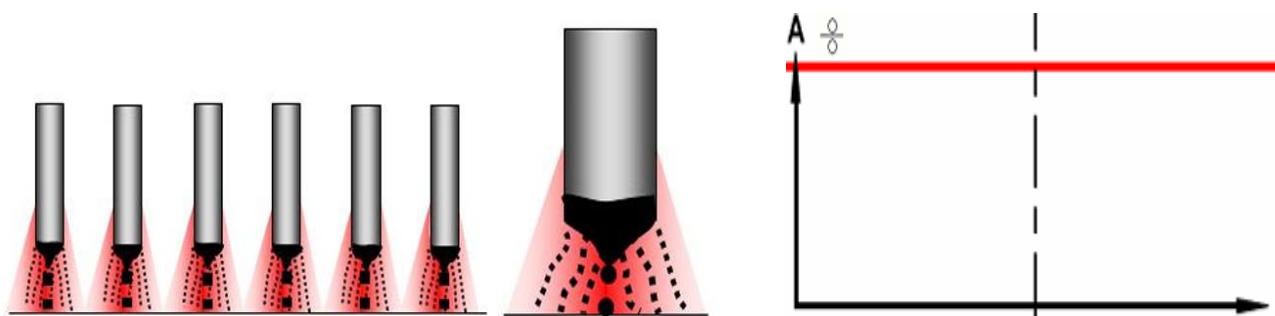


Figure I. 20. Transfert des gouttelettes et stabilité du courant pendant le cycle de soudage en spray arc [45]

I.9.4. Transfert pulsé (pulsed spray transfer)

Dans le transfert pulsé, le courant alterne entre un courant de base faible et des pics de courant élevés, contrôlés par le générateur.

Chaque pic de courant permet le détachement d'une seule goutte de métal en direction du bain de fusion. [46]

Ce mode combine les avantages du court-circuit et du spray, il réduit l'apport thermique tout en assurant un transfert stable et contrôlé, avec peu de projections.

Il est adapté à toutes les positions de soudage et à une large gamme d'épaisseurs.

Cependant, il nécessite un poste synergique plus complexe et un réglage plus délicat que les autres modes.

Ce procédé est largement utilisé dans l'aéronautique, l'automobile et l'industrie ferroviaire, notamment pour le soudage de l'aluminium, de l'inox et des aciers à haute résistance.

La figure I.21 illustre le domaine des paramètres du transfert pulsé.

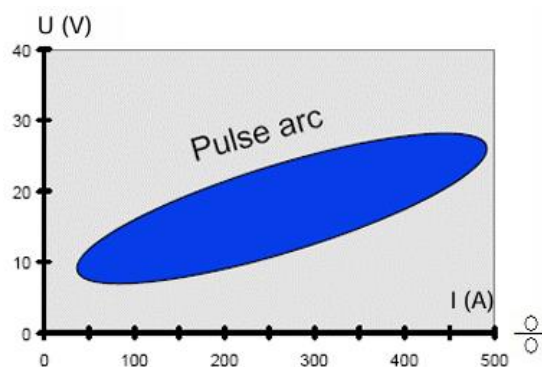


Figure I. 21. Domaine des paramètres du transfert pulsé [47]

Au terme de chaque pulsation de courant, une gouttelette de métal en fusion va se détacher.

- Courant pulsé ;
- Courant de transition ;
- Courant de soudage faible ;
- Courant de fond ;

Le courant pulsé est réglé pour une pénétration et un apport d'énergie corrects. Le niveau du courant de fond est maintenu bas afin d'assurer à la fois un courant de soudage faible et un apport d'énergie faible.

La figure I.22 illustre le transfert des gouttelettes et l'évolution du courant pulsé en fonction du temps.

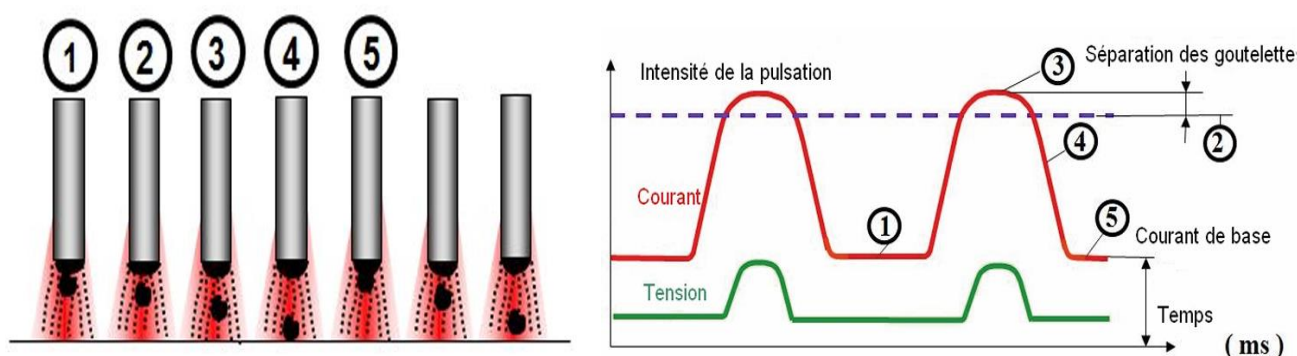


Figure I. 22. Transfert des gouttelettes et évolution du courant pulsé en fonction du temps [48]

I.9.5. Avantages et inconvénients des modes de transfert

Le tableau ci-dessous présente une comparaison des modes de transfert en soudage MIG/MAG.

Tableau I. 3. Comparaison des modes de transfert en soudage MIG/MAG. [49]

Mode de transfert	Inconvénients	Avantages
Arc de court-circuit	• Risque plus élevé de projections et de collage • Nécessite un réglage correct de l'inductance	• Bonne maîtrise du bain de fusion • Soudage en position • Adapté aux tôles de faible épaisseur
Arc globulaire	• Très irrégulier • Régime de transition avec projections de gouttelettes	• Moins de risques d'erreurs qu'en short-arc
Spray arc	• Impossible de souder en position • Pénétration difficile à contrôler	• Haut rendement
Arc pulsé	• Machine de soudage plus coûteuse	• Très bon contrôle du bain en position de soudage • Diminution des projections • Haut rendement énergétique • Arc plus stable que le spray arc

I.10. Modes 2T et 4T en soudage MIG/MAG

Le choix entre les modes de soudage 2T et 4T en soudage MIG/MAG représente la manière dont l'opérateur va contrôler son arc électrique et le dévidage du fil depuis la gâchette de la torche.

Le « T » fait référence au « toucher » et, signifie donc le nombre de fois que l'on va actionner la gâchette pour démarrer et arrêter le soudage.

Ces modes sont très utiles selon la longueur de soudure recherchée ou selon le confort d'utilisation.

I.11.1. Mode 2T (2 touches)

Le mode 2T fonctionne comme un simple système marche/arrêt :

- Appui sur la gâchette : Amorçage de l'arc électrique et démarrage immédiat du dévidage du fil ;
- Maintien de la gâchette : Le soudage se poursuit avec les paramètres pré réglés (courant, tension, vitesse de dévidage du fil) ;
- Relâchement de la gâchette : Extinction de l'arc et arrêt du dévidage du fil ;

Ce mode est idéal pour les soudures courtes, les points de soudure et les travaux intermittents où il est nécessaire de démarrer et d'arrêter fréquemment.

La figure I.23 illustre la séquence des phases de soudage en mode 2T.

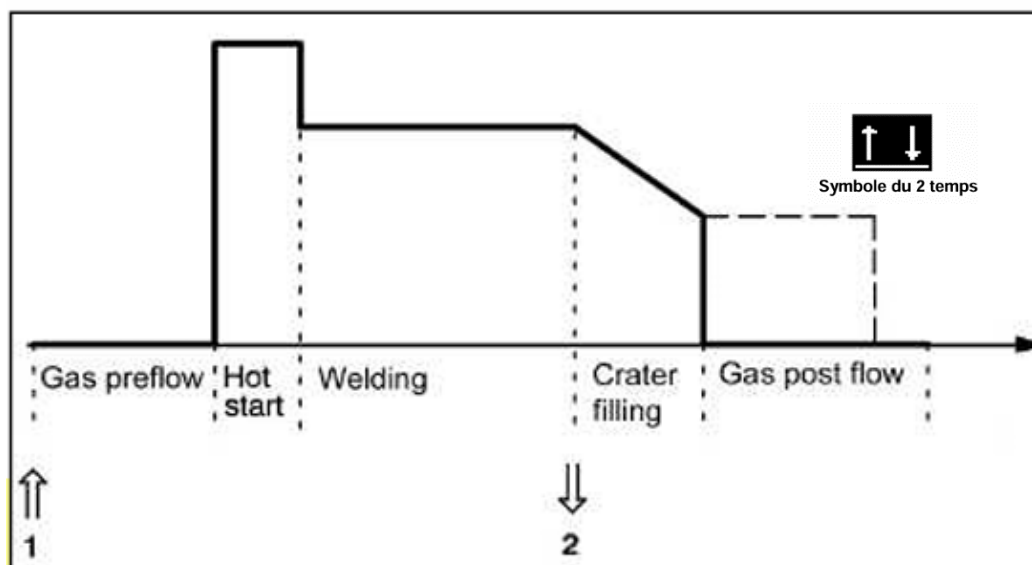


Figure I. 23. Séquence des phases de soudage en mode 2T [50]

I.11.2. Mode 4T (4 touches)

Le mode 4T est conçu pour les soudures longues et offre un meilleur contrôle du cycle de soudage. Contrairement au mode 2T, il ne nécessite pas de maintenir la gâchette enfoncée pendant toute la durée du soudage.

Son fonctionnement se déroule en quatre étapes :

- 1ère pression sur la gâchette : Amorçage de l'arc et démarrage du dévidage du fil ;
- Relâchement de la gâchette : Le soudage se poursuit automatiquement avec les paramètres prééglés (courant, tension, vitesse fil) ;
- L'opérateur soude librement : Sans maintenir la gâchette, ce qui réduit la fatigue sur les longues distances ;
- 2ème pression sur la gâchette : Début de l'arrêt progressif du dévidage du fil et extinction de l'arc ;

Ce mode est recommandé pour les soudures longues, les grandes pièces et les zones difficiles d'accès.

La figure I.24 illustre la séquence des phases de soudage en mode 4T.

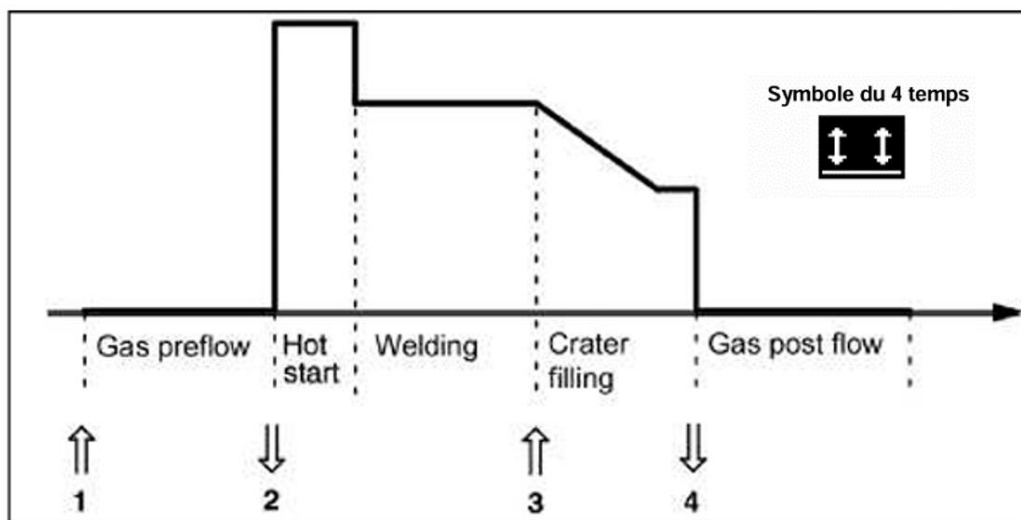


Figure I. 24. Séquence des phases de soudage en mode 4T [51]

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre les modes 2T et 4T.

Tableau I. 4. Comparaison entre les modes 2T et 4T.

Critère	Mode 2T	Mode 4T
Type de soudure	Courte et discontinue	Longue et continue
Confort de l'opérateur	Exige de maintenir la gâchette enfoncée	Permet de souder sans maintenir la gâchette
Dévidage du fil	Démarre et s'arrête avec la gâchette	Continu après le premier relâchement
Précision	Adapté aux points de soudure et petits assemblages	Plus stable pour les passes longues
Accessibilité	Facile d'utilisation	Requiert plus de contrôle
Fatigue	Contraignant sur de longues soudures	Réduit la fatigue sur de longues distances
Application	Travaux intermittents	Grandes pièces et zones difficiles d'accès

I.11.3. Fonctionnement des modes 2T et 4T en soudage MIG/MAG

Les modes 2T et 4T fonctionnent comme un système de contrôle du dévidage du fil et de l'arc électrique.

Alors que le soudage manuel exige de maintenir en permanence la gâchette enfoncée, les modes 2T et 4T utilisent des paramètres préréglés (courant, tension, vitesse de dévidage du fil), contrôlés directement via la gâchette de la torche.

I.11.4. Détails du mode 2T en MIG/MAG

Le processus de soudage s'effectue selon les étapes suivantes :

- L'opérateur définit à l'avance le courant, la tension et la vitesse de dévidage du fil
- En appuyant sur la gâchette, l'arc s'amorce et le dévidage du fil démarre automatiquement
- Tant que la gâchette est maintenue enfoncée, le soudage se poursuit avec les paramètres préréglés

- En relâchant la gâchette, le dévidage du fil s'arrête et l'arc s'éteint immédiatement

I.11.5. Détails du mode 4T en soudage MIG/MAG

Dans les machines avancées, le fonctionnement du soudage se déroule selon plusieurs étapes bien définies. Le réglage préalable permet de préparer les paramètres essentiels du procédé, puis le démarrage et l'arrêt du soudage sont gérés de manière progressive afin d'améliorer le confort et la qualité du cordon. Les étapes sont les suivantes :

- Définition de la vitesse de dévidage du fil et du courant de démarrage ;
- Réglage du courant et de la tension de travail ;
- Définition des paramètres d'arrêt afin d'éviter les cratères en fin de cordon ;
- Première pression et maintien de la gâchette : amorçage de l'arc et démarrage du dévidage du fil ;
- Soudage se poursuit automatiquement avec les paramètres de travail préréglés ;
- Soudage en cours sans maintien de la gâchette, ce qui réduit la fatigue lors des longues opérations ;
- Deuxième pression sur la gâchette : arrêt progressif du dévidage du fil ;
- Relâchement : extinction complète de l'arc ;

I.11. Cycle de soudage sur un générateur MIG/MAG

Le cycle de soudage sur un générateur MIG/MAG correspond à l'ensemble des phases successives permettant l'établissement, le maintien et l'arrêt de l'arc électrique dans des conditions optimales.

Le cycle de soudage se compose de deux phases principales :

- Le temps de soudage (T_s) : période durant laquelle l'arc électrique est établi et où la soudure est réalisée ;
- Le temps de repos (T_r) : correspond à la période pendant laquelle le générateur est mis à l'arrêt afin de permettre son refroidissement ;[52]

Ce cycle est généralement automatisé au niveau du générateur, ce qui permet d'assurer la stabilité du procédé ainsi que la qualité du cordon de soudure.

I.11.1. Phases du cycle sur un générateur MIG/MAG

I.11.1.1. Pré gaz

Le cycle débute par la phase de pré-gaz (pré-débit de gaz), durant laquelle le gaz de protection est libéré avant l'amorçage de l'arc.

Cette étape a pour objectif de chasser l'air ambiant et de protéger la zone de soudage contre l'oxydation.

Dès que le soudeur actionne la gâchette de la torche, une temporisation de pré-gaz se déclenche, assurant l'évacuation de l'air ambiant présent dans la buse et l'inertage de la zone de soudage avant l'amorçage de l'arc électrique. [53]

I.11.1.2. Importance du pré gaz

Généralement 0 à 2 secondes

- Permet de préparer la zone de soudage ;
- Crée une atmosphère protectrice autour du bain de fusion ;
- Évite le contact du métal en fusion avec l'air ambiant (oxygène, azote, humidité) ;
- Réduit les défauts de soudure tels que les porosités et l'oxydation ;

I.11.1.3. Amorçage de l'arc

Lors de l'appui sur la gâchette de la torche à souder, trois actions se produisent en parallèle : le fil de soudure se déroule et avance à une vitesse préalablement programmée, le gaz s'échappe de la buse, et le fil électrifié par le tube contact crée l'arc électrique.

Le dynamisme d'amorçage permet de faciliter l'établissement de l'arc grâce à une surintensité appliquée au démarrage. Il peut être réglé automatiquement ou ajusté manuellement via l'interface du poste de soudage. [54]

Ensuite intervient la phase d'amorçage de l'arc : le fil-électrode est entraîné vers la pièce à souder jusqu'à établir un contact électrique, provoquant un court-circuit et l'allumage de l'arc.

Le générateur ajuste instantanément le courant et la tension afin de stabiliser l'arc dès son initiation.

I.11.1.4. Soudage (arc établi)

La phase de soudage proprement dite constitue le cœur du cycle.

Durant cette étape, le générateur régule en continu les paramètres électriques ainsi que la vitesse d'avance du fil, afin de maintenir un transfert de métal stable selon le mode choisi.

Cette régulation assure une fusion homogène et une pénétration adéquate du joint. Lorsque l'opérateur relâche la gâchette, le cycle passe à la phase de remplissage du cratère.

Le générateur réduit progressivement le courant afin d'éviter la formation de défauts tels que les fissures de retrait en fin de cordon.

Pendant cette phase

- Le fil est dévidé en continu ;
- Le bain de fusion est protégé par le gaz ;
- Le soudeur contrôle (la vitesse d'avance, La distance torche-pièce) ;

Facteurs importants : (Tension Vitesse fil, Type de transfert).

Les paramètres de soudage sont programmés dans le générateur afin d'évoluer de manière coordonnée selon une loi prédéfinie. L'inductance permet de limiter le courant de court-circuit, réduisant ainsi la formation de projections. [55]

I.11.1.5. Extinction de l'arc (fin de cordon)

La fonction évanouissement de l'arc évite le cratère en fin de soudage et les risques de fissuration, particulièrement en alliage léger.

Quand on relâche la gâchette :

- Arrêt du courant ;
- Arrêt du dévidage ;
- Possibilité de burn-back control, empêche le fil de coller à la pièce ;

En particulier en présence de tôles épaisses et alliage léger, lorsque des cratères de fin de cordon peuvent se produire, il est recommandé de retirer l'arc lentement du bain ou, si le système utilisé le permet, de définir un programme de remplissage de cratère de fin. [56]

I.11.1.6. Postgaz

Sur la plupart des systèmes, une durée de post-écoulement spécifique pour le gaz de protection peut être définie, de sorte que le métal fondu en dernier puisse se solidifier sous la protection gazeuse. Toutefois, cette méthode n'est efficace que si la torche de soudage est maintenue au niveau de l'extrémité du cordon pendant une durée suffisante. [57]

Enfin, le cycle se termine par la phase de post-gaz (post-débit de gaz), durant laquelle le gaz de protection continue de s'écouler pendant quelques secondes après l'extinction de l'arc.

Cette étape permet de protéger le bain de fusion encore chaud contre l'oxydation atmosphérique.

Sur la plupart des systèmes, une durée de post-écoulement spécifique pour le gaz de protection peut être définie, de sorte que le métal fondu en dernier puisse se solidifier sous la protection gazeuse. Toutefois, cette efficacité n'est assurée que si la torche de soudage est maintenue à l'extrémité du cordon pendant une durée suffisante. [58]

I.11.2. Facteur de marche (Duty Cycle)

Le facteur de marche (ou duty cycle) d'un générateur de soudage, défini selon la norme NF EN 60974-1, correspond au pourcentage de temps, sur une période de référence de 10 minutes, pendant lequel l'équipement peut fonctionner à une intensité donnée sans risque de surchauffe. [59]

Un facteur de marche de 200 A à 60 % signifie que, sur un cycle de 10 minutes, le poste de soudage peut délivrer un courant de 200 A pendant 6 minutes, puis doit s'arrêter pendant 4 minutes afin d'éviter toute surchauffe, dans des conditions de température ambiante ne dépassant pas 40 °C. [60]

Pour un générateur utilisé en mode manuel, le facteur de marche est généralement spécifié à 60 %. En revanche, dans le cas du soudage automatisé, il peut être indiqué à 100 %, en raison des conditions de fonctionnement plus stables et mieux contrôlées. [61]

I.12. Positions de soudage

Les positions de soudage constituent un élément essentiel dans la réalisation des assemblages soudés, car elles influencent directement la qualité du cordon, la pénétration et la facilité d'exécution.

La figure I.25 illustre les différentes positions de soudage utilisées selon la configuration des pièces et les exigences du procédé.

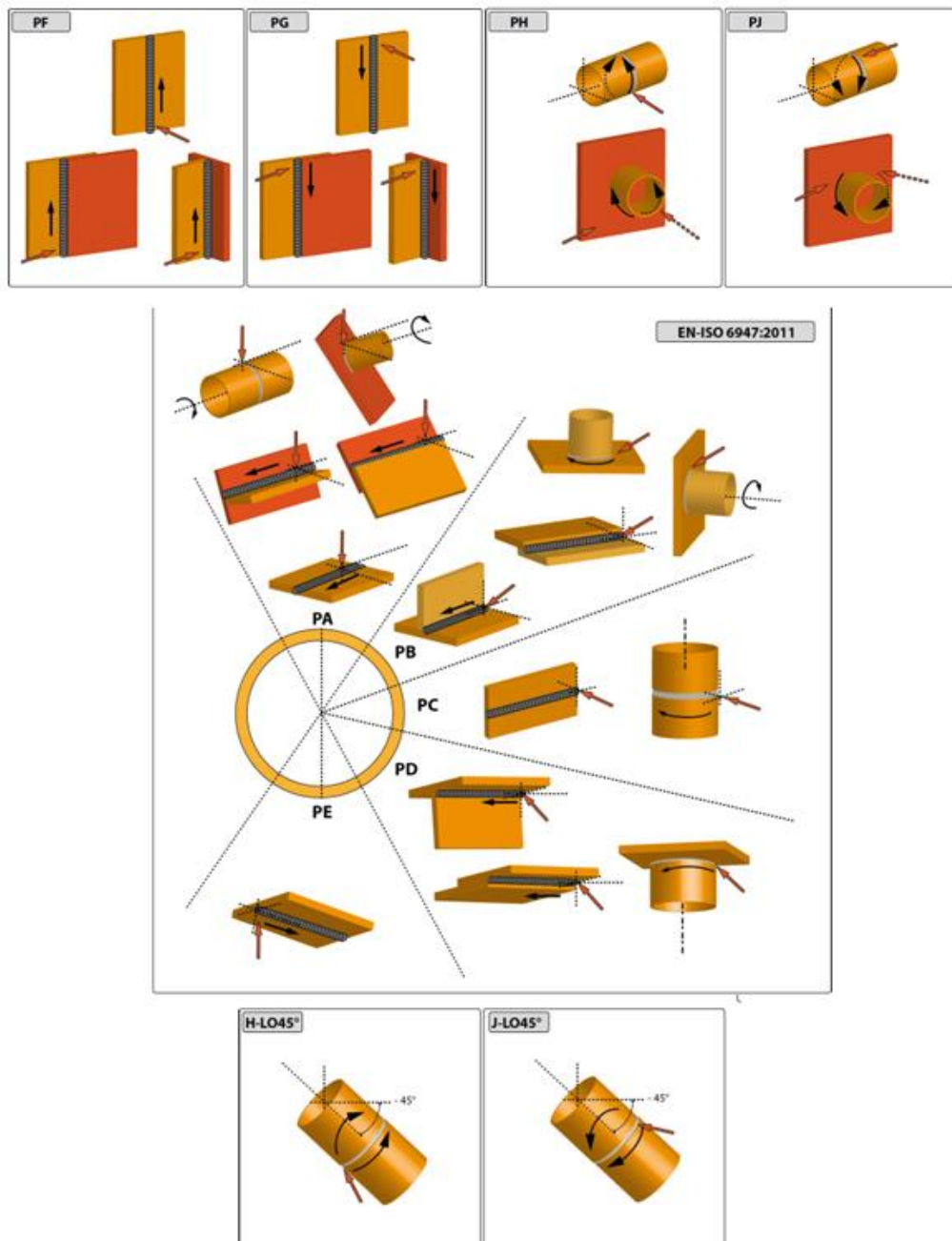


Figure I. 25. Positions de soudage [62]

I.13. Équipements de protection individuelle

Les équipements de protection individuelle (EPI) jouent un rôle essentiel dans la prévention des risques professionnels en soudage, en garantissant la sécurité et l'intégrité physique de l'opérateur.

- Casque de soudeur ;
- Casque noir avec indice de protection DIN 11 à 12 ;
- Éventuellement équipé d'un système de filtration et d'alimentation en air ;
- Vêtements de soudage ininflammables (en coton) ;
- Chaussures de sécurité ;
- Gants de soudage ;
- Lunettes de sécurité ou écran facial (pour le meulage) ;

La figure I.26 illustre les équipements de protection individuelle.



Figure I. 26. Équipements de protection individuelle [63]

Chapitre II

Equipements de soudage

MIG/MAG

II.1. Introduction

Le soudage MIG/MAG est une technique très utilisée dans les industries modernes. Le procédé MIG/MAG est notamment utilisé dans les secteurs de l'aéronautique, du spatial, de l'automobile et de la pétrochimie.

Il permet de réaliser des assemblages soudés précis et de haute qualité.

Il assure également une productivité élevée et permet le traitement d'une large gamme de matériaux.

Cependant, pour profiter pleinement du soudage MIG/MAG, il est nécessaire de connaître précisément les équipements utilisés. Cette connaissance est indispensable.

Le générateur de courant, l'unité d'alimentation en fil, les gaz de protection et la torche de soudage sont tous indispensables.

Ces équipements assurent la stabilité de l'arc électrique, la qualité du cordon de soudure et l'homogénéité du dépôt métallique.

Ce texte décrit les équipements du soudage MIG/MAG, il explique le mode de fonctionnement de ces équipements et met en avant leur importance dans le procédé.

Ces connaissances permettent de choisir les équipements adaptés, d'ajuster les réglages et d'assurer des soudures de haute qualité répondant aux exigences spécifiques de chaque projet.

La figure II.27 illustre le schéma explicatif du procédé MIG/MAG.

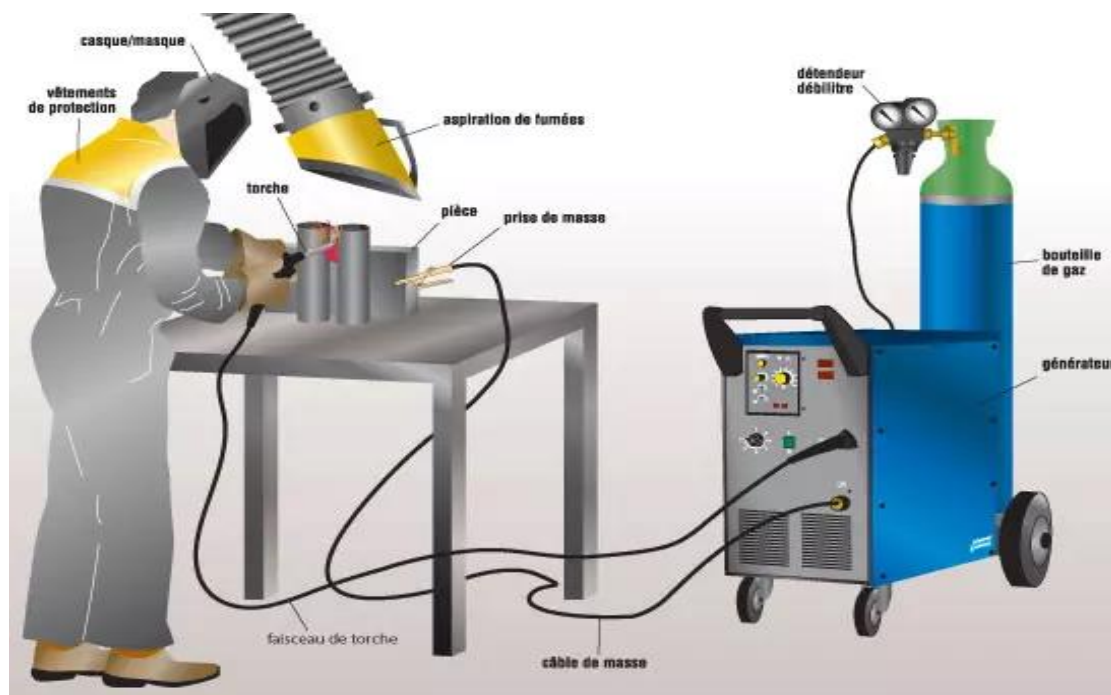


Figure II. 27. Schéma explicatif du procédé MIG/MAG [64]

II.2. Générateurs de soudage MIG/MAG

Les générateurs de soudage MIG/MAG constituent l'élément fondamental du processus de soudage, car ils assurent la fourniture de l'énergie électrique nécessaire à la formation et au maintien de l'arc électrique, ainsi que sa régulation.

Ils permettent également de contrôler les paramètres essentiels tels que la tension, l'intensité et la vitesse d'alimentation du fil, ce qui influe directement sur la qualité de la soudure.

Le générateur est une source de courant continu ou alternatif avec redresseur (par commutateur, à réglage continu thyristorisé, de type onduleur appelé inverter, ou onduleur transistorisé).

Il régule la tension de soudage, laquelle conditionne le mode de transfert du métal, à savoir le court-circuit, la pulvérisation axiale, le transfert globulaire ou encore le régime pulsé. [65]

Certains équipements sont dits synergiques : le réglage d'un paramètre entraîne automatiquement l'ajustement de l'intensité en fonction de la vitesse, afin de maintenir une énergie de soudage constante. [66]

Il existe de nombreux types de générateurs MIG/MAG, classés selon leur technologie et leurs caractéristiques.

Les sources d'alimentation modernes utilisées pour le soudage MIG/MAG reposent sur la technologie onduleur.

Cette avancée technologique présente de nombreux avantages : les générateurs sont plus compacts, plus légers et capables de fournir une tension de sortie stable et constante, condition essentielle à la régularité de l'arc électrique et à la qualité de la soudure.

Pour répondre aux besoins croissants de l'industrie, qui exige le soudage de matériaux de plus en plus variés dans des configurations complexes, les fabricants de machines à souder ont développé différents types de sources d'alimentation adaptées au procédé MIG/MAG.

La recherche et le développement dans ce domaine demeurent un axe majeur, avec pour objectif l'amélioration continue de la stabilité de l'arc électrique, du contrôle des paramètres de soudage et de la polyvalence des équipements. Les sources d'alimentation pour le soudage MIG/MAG sont disponibles en différentes capacités et niveaux de sophistication.

Ces appareils vont de simples générateurs destinés aux applications courantes jusqu'à des équipements multifonctions très avancés, intégrant des programmes synergiques, des systèmes de contrôle numérique et diverses options de égale.

La figure II.28 illustre le poste de soudage MIG/MAG.

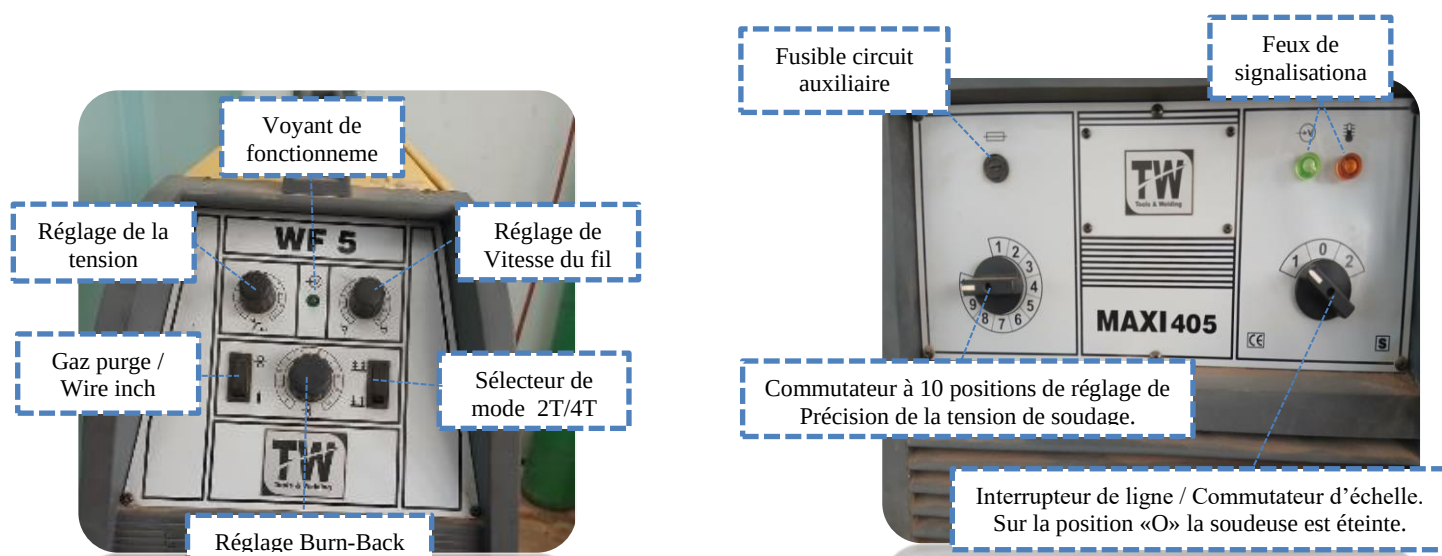


Figure II. 28. Poste de soudage MIG/MAG.

II.3. Système de dévidage

- Le support de bobine comporte un frein ajustable pour s'assurer que la bobine se bloque immédiatement dès que le dévidage s'arrête ;
- Le dévidoir alimente la torche en fil à travers la gaine guide-fil, dans les faisceaux de liaison ;

La figure II.29 illustre le système de dévidage du fil électrode.

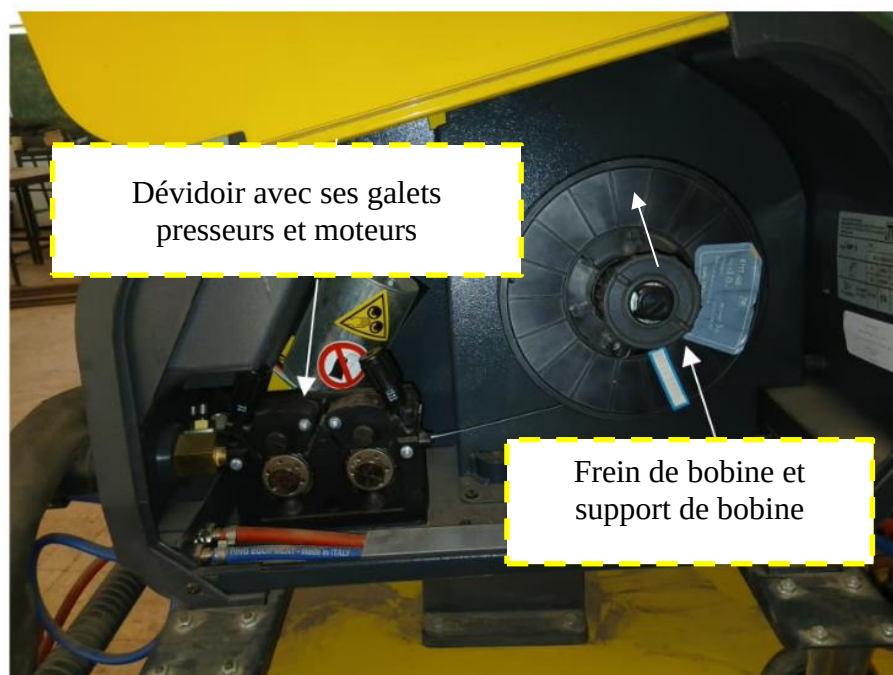


Figure II. 29. Système de dévidage du fil électrode

II.3.1. Types de moteurs de dévidage

Les moteurs peuvent être :

- A aimant permanent ;
- De Type tachymétrique ;
- De type codeur ;

Le type codeur offre un contrôle plus précis, ce qui s'avère important, particulièrement à des vitesses réduites.

II.3.1.1. Types de galets de dévidage

- Galets à gorge en V : utilisés généralement pour les fils pleins (fil acier), ils assurent une bonne traction et un entraînement stable du fil ;
- Galets à gorge en U : destinés aux fils tendres comme l'aluminium, ils permettent de réduire les déformations du fil lors de son passage ;
- Galets crantés : utilisés pour les fils fourrés, ils améliorent l'adhérence et évitent le glissement du fil pendant le dévidage ;

Le bon choix des galets de dévidage contribue directement à la stabilité de l'alimentation du fil, et donc à la qualité et à la stabilité de l'arc de soudage.

La figure II.30 illustre les types de galets d'entraînement.

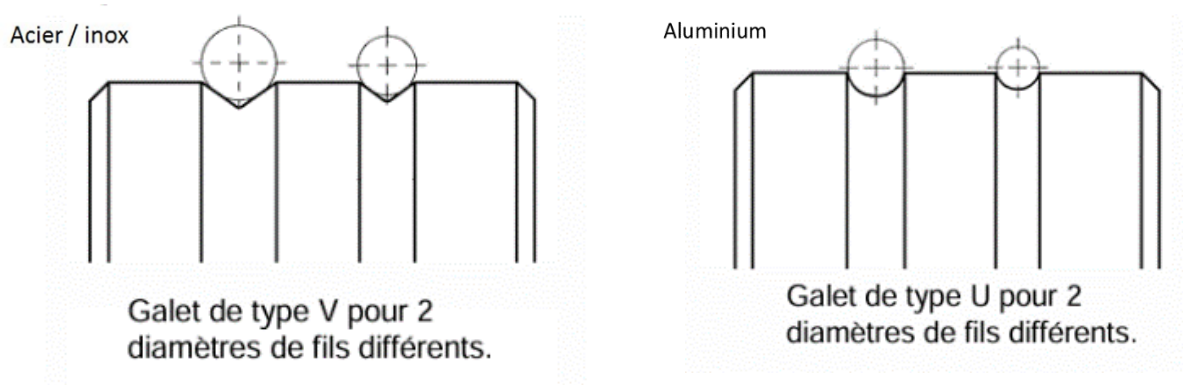


Figure II. 30.Types de galets d'entraînement [67]

II.4. Torches de soudage MIG/MAG

La torche de soudage MIG/MAG constitue un élément essentiel du procédé, elle assure l'acheminement continu du fil-électrode consommable vers la zone de soudage, dirige le flux de gaz de protection autour du bain de fusion et permet la transmission du courant électrique nécessaire à la formation et au maintien de l'arc de soudage.

Elle achemine le fil-électrode consommable jusqu'à la zone de soudage et est reliée au générateur par un faisceau de connexion qui assure à la fois l'alimentation électrique, l'acheminement du gaz de protection et le guidage du fil à travers une gaine-guide vers le contact coulissant, point de transmission du courant au fil.

La figure II.31 illustre la torche de soudage MIG/MAG.



Figure II. 31. Torche de soudage MIG/MAG

La torche MIG/MAG est composée des éléments suivants : tube contact, diffuseur, buse de soudage, gâchette, col de cygne, poignée et faisceau.

La figure II.32 illustre les composants d'une torche de soudage MIG/MAG.

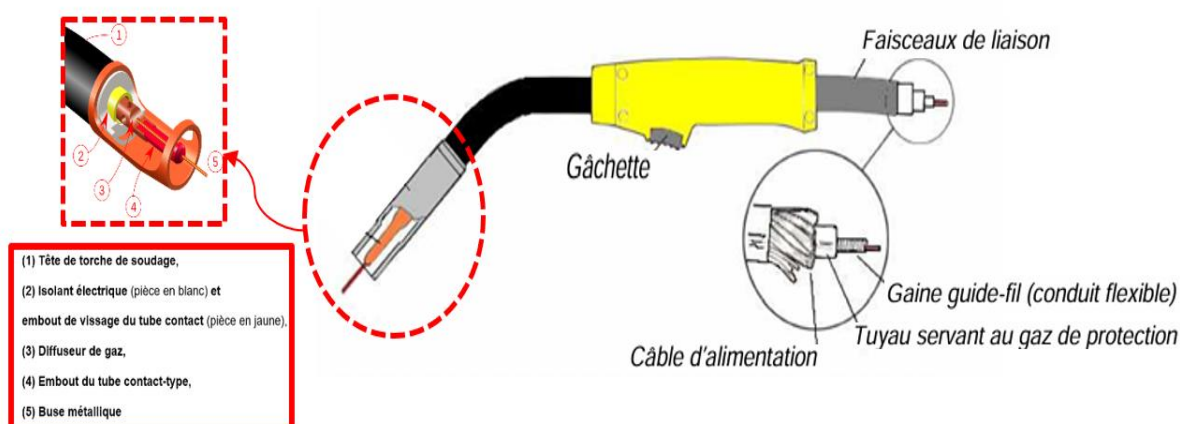


Figure II. 32. Composants d'une torche de soudage MIG/MAG [68]

Le faisceau de soudage est composé de la gaine guide-fil, du câble d'alimentation électrique, du tuyau de gaz de protection ainsi que des conduites d'arrivée et de sortie d'eau pour les torches à refroidissement liquide. Sa longueur est généralement comprise entre 3 et 4 mètres. [69]

Et il existe deux techniques de système de dévidage : **système Push ou Push-Pull**.

- Push : Les dévidoirs poussent le fil dans la gaine guide-fil ;
- Push-Pull : Il s'agit d'un système double dans lequel le fil est poussé au travers de la gaine guide-fil au moyen d'un dévidoir standard pendant qu'un autre système situé dans la torche tire le fil ;

C'est la raison pour laquelle on parle de système push-pull, il permet d'utiliser des faisceaux de liaison bien plus longs.

La figure II.33 illustre la comparaison des systèmes d'acheminement du fil Push et Push-Pull.

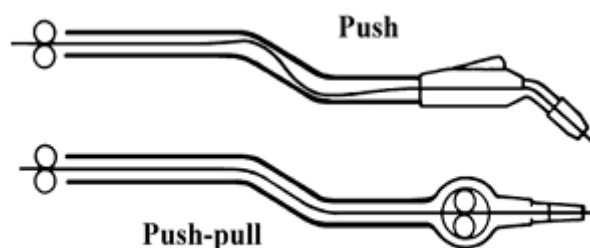


Figure II. 33 .Comparaison des systèmes d'acheminement du fil Push et Push-Pull [70]

Le push-pull est également recommandé pour des fils en aluminium (en revanche, ceci peut causer des problèmes lors du dévidage dans la mesure où il s'agit d'un fil doux).

Le choix du type de torche dépend de l'intensité du courant, du diamètre du fil utilisé et de la fréquence d'utilisation.

Pour des courants de faible intensité et un usage intermittent, une torche à refroidissement naturel, utilisant simplement le flux de gaz de protection pour dissiper la chaleur, est suffisante.

En revanche, pour des intensités plus élevées, généralement comprises entre 300 et 500 A, et dans le cas de soudages continus ou à cadence élevée, il est nécessaire d'opter pour une torche à refroidissement par eau.

Ce système plus performant permet une meilleure dissipation thermique, préserve l'intégrité des composants internes et prolonge la durée de vie de l'équipement.

La torche MIG/MAG représente un composant clé du système de soudage, dont le choix et l'entretien influencent directement la performance du procédé et la qualité des assemblages.

La figure II.34 illustre l'unité de refroidissement du poste de soudage MIG/MAG.



Figure II. 34. Unité de refroidissement du poste de soudage MIG/MAG

II.5. Choix de la gaine guide-fil de soudage

Dans le procédé de soudage MIG/MAG, le choix de la gaine guide-fil est un élément essentiel pour assurer une alimentation régulière et stable du fil-électrode à travers la torche, ce qui contribue directement à la stabilité de l'arc électrique et à la qualité de la soudure.

Le choix de cette gaine dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de fil utilisé, son diamètre, la longueur du faisceau de soudage ainsi que la nature de l'application industrielle.

Il existe différents types de gaines guide-fil, comme les gaines métalliques adaptées aux fils pleins, et les gaines en plastique ou en téflon (PTFE), utilisées principalement pour les fils en aluminium ou les fils plus souples, afin de réduire les frottements et d'éviter toute déformation du fil lors de son passage.

Un bon choix de gaine permet de diminuer la résistance au passage du fil dans la torche, ce qui aide à éviter les problèmes d'alimentation tels que les blocages, les irrégularités d'avance du fil ou les instabilités de l'arc, garantissant ainsi de meilleures performances de soudage.

La figure II.35 illustre la gaine guide-fil.



Figure II. 35 . Gaine guide-fil [71]

II.6. Types de buses de torche de soudage MIG/MAG

En soudage MIG/MAG, la buse joue un rôle crucial en dirigeant le flux de gaz de protection autour du fil-électrode et du bain de fusion, assurant ainsi une protection optimale contre l'oxydation et les contaminations externes.

Elle contribue également à concentrer le gaz de protection sur la zone de soudure et à maintenir une couverture gazeuse uniforme et stable.

Des modifications spécifiques ne sont nécessaires qu'en cas de besoin (soudage en espaces confinés, positions difficiles, exigences particulières de pénétration des joints, risque élevé de projections de soudure, etc...).

La figure II.36 illustre les formes et les types de buses de torche MIG/MAG.

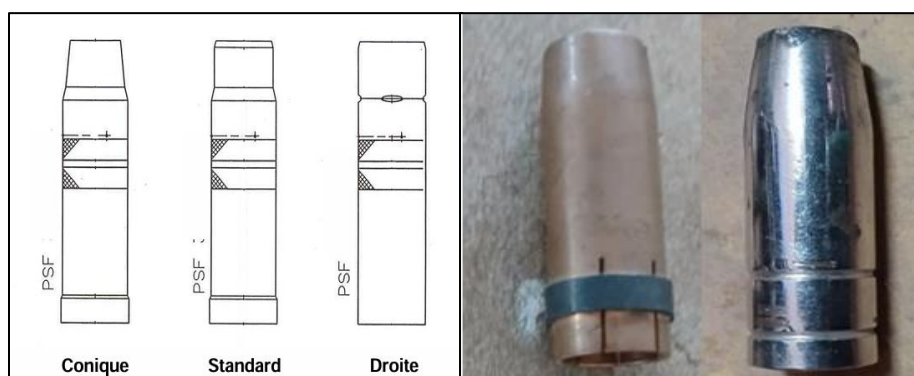


Figure II. 36. Formes et types de buses de torche MIG/MAG [72]

II.6.1. Matériaux de fabrication des buses de soudage MIG/MAG

Les buses de torche de soudage MIG/MAG peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux, chacun présentant des propriétés spécifiques adaptées à des besoins particuliers :

Le tableau ci-dessous présente une comparaison des matériaux des buses utilisés en soudage MIG/MAG.

Tableau II.5. Comparaison des matériaux de buses pour le soudage MIG/MAG.

Matériau	Caractéristiques	Applications
Cuivre et alliages de cuivre	• Excellente conductivité thermique • Bonne dissipation de la chaleur • Résistance satisfaisante aux projections	• Majorité des applications • MIG/MAG courantes
Laiton	• Meilleure résistance mécanique que le cuivre pur • Bonne durabilité • Résistance accrue à l'usure mécanique	• Applications à intensité • Moyenne et élevée
Cuivre chromé ou cuivre-zirconium	• Excellente résistance mécanique et thermique • Réduction de l'accumulation de projections	• Applications industrielles exigeantes • Haute intensité • Soudage continu
Buses à revêtement anti-adhérent	• Traitement de surface anti-projection (céramique ou silicone) • Prolonge la durée de vie · maintien d'un débit de gaz régulier	• Applications avec projections élevées • Réduction des opérations de nettoyage

II.6.2. Facteurs influençant le choix du diamètre de buse en soudage MIG/MAG

Le choix du diamètre de la buse en soudage MIG/MAG ne repose pas sur un seul critère isolé, mais résulte de l'interaction de plusieurs paramètres interdépendants.

Une sélection inadaptée peut entraîner une protection gazeuse insuffisante, une instabilité de l'arc électrique ou une dégradation prématurée de l'équipement.

II.6.2.1. Épaisseur de la pièce à souder

L'épaisseur de la pièce constitue le facteur fondamental dans le processus de sélection. Plus le diamètre du fil-électrode requis est grand, plus le diamètre de buse nécessaire est important afin d'assurer un écoulement adéquat du gaz de protection autour du bain de fusion.

Le tableau ci-dessous présente la sélection du diamètre de la buse en fonction de l'épaisseur de la pièce.

Tableau II. 6. Sélection du diamètre de la buse en fonction de l'épaisseur de la pièce. [73]

Diamètre de buse (mm)	Utilisation
10 – 12	Travaux légers
12 – 14	Epaisseur moyenne
14 – 16	Pièces plus épaisses
16 – 18	Forte épaisseur
18 – 20	Très forte épaisseur
20 – 22	Applications industrielles lourdes

II.6.2.2. Diamètre du fil-électrode

Le diamètre du fil-électrode influe directement sur le choix du diamètre de buse, un fil de grand diamètre nécessite une buse plus large pour permettre son passage sans frottement excessif et garantir une distribution homogène du gaz de protection autour de la zone de fusion.

Le tableau ci-dessous présente la correspondance entre le diamètre de la buse et le diamètre du fil.

Tableau II. 7. Correspondance entre le diamètre de la buse et le diamètre du fil. [74]

Diamètre de buse (mm)	Diamètre du fil (mm)
10 – 12	0,6
12 – 14	0,8
14 – 16	1,0
16 – 18	1,2
18 – 20	1,6
20 – 22	2,0

II.6.2.3. Intensité du courant de soudage

Une intensité élevée génère une chaleur importante au niveau de la torche et du bain de fusion. Plus l'intensité est élevée, plus le diamètre de buse requis est grand, afin d'assurer un écoulement adéquat du gaz de protection autour du bain de fusion et du fil-électrode consommable.

Le tableau ci-dessous présente la correspondance entre le diamètre de la buse et l'intensité de soudage.

Tableau II. 8. Correspondance entre le diamètre de la buse et l'intensité de soudage. [75]

Diamètre de buse (mm)	Intensité (A)
10 – 12	30 – 120
12 – 14	80 – 180
14 – 16	150 – 250
16 – 18	200 – 320
18 – 20	300 – 400
20 – 22	> 400

II.6.2.4. Débit de gaz de protection

Le débit de gaz doit être adapté au diamètre de la buse, un diamètre de buse plus grand nécessite un débit plus élevé pour maintenir une couverture gazeuse homogène sur l'ensemble du bain de fusion.

Un débit insuffisant par rapport au diamètre de la buse entraîne une protection incomplète et favorise l'apparition de porosités dans le cordon de soudure.

Le tableau ci-dessous présente la correspondance entre le diamètre de la buse et le débit du gaz de protection.

Tableau II. 9. Correspondance entre le diamètre de la buse et le débit du gaz de protection. [76]

Diamètre de buse (mm)	Débit de gaz (L/min)
10	10 – 7
12	10 – 12
14	14 – 16
16 – 18	14 – 18

II.6.2.5. Nature du gaz de protection

La nature du gaz influe sur le comportement de l'écoulement gazeux à la sortie de la buse.

Le CO₂ pur génère une pression d'arc plus élevée et nécessite une buse plus large pour éviter les turbulences.

En revanche, les mélanges Ar/CO₂ offrent un écoulement plus stable et permettent l'utilisation de buses de diamètre standard.

II.6.2.6. Position de soudage

La position de soudage influence le comportement du bain de fusion et, par conséquent, le choix de la buse.

En position à plat, une buse de diamètre standard est généralement suffisante.

En position verticale ou en plafond, une buse de diamètre réduit est préférable afin de concentrer le flux de gaz et d'améliorer la protection de la zone de fusion dans les configurations où la gravité défavorise la stabilité du bain.

II.6.2.7. Nature du matériau de base

Le matériau à souder constitue également un critère déterminant. L'aluminium, très sensible à l'oxydation, nécessite une buse de grand diamètre associée à un débit de gaz élevé pour garantir une protection optimale.

Le soudage de l'acier inoxydable requiert une buse de diamètre intermédiaire avec un débit de gaz précisément contrôlé, afin d'éviter toute contamination susceptible d'altérer la résistance à la corrosion du joint soudé.

L'acier ordinaire, moins sensible à l'oxydation, admet des buses de diamètre standard dans la majorité des configurations.

II.6.2.8. Adaptation des buses aux conditions de soudage

Le choix de la buse ne se limite pas à son diamètre.

Il doit également tenir compte des conditions spécifiques de soudage, notamment la nature du matériau, la position de soudage, le type de gaz utilisé et le niveau de projections généré.

Une buse inadaptée aux conditions opératoires peut provoquer une protection gazeuse insuffisante, une usure prématurée de l'équipement ainsi qu'une dégradation de la qualité du cordon de soudure. [77]

II.7. Embout contact (Contact tip)

L'embout contact est une pièce essentielle de la torche de soudage MIG/MAG. Il assure le passage du fil-électrode et le transfert du courant électrique vers celui-ci, permettant ainsi la formation et la stabilité de l'arc de soudage.

Il garantit un contact électrique constant et précis entre la torche et le fil, tout en guidant ce dernier vers la zone de soudage.

Généralement fabriqué en cuivre ou en alliages de cuivre, l'embout contact se distingue par sa bonne conductivité électrique et sa résistance à l'usure et aux hautes températures.

La figure II.37 illustre les embouts de contact.



Figure II. 37 . Embouts de contact

II.8. Fils-électrodes en soudage MIG/MAG

Le choix du fil-électrode est déterminant pour la qualité de l'assemblage, il doit être compatible avec le métal de base en termes de composition chimique et de propriétés mécaniques, et adapté aux paramètres de soudage tels que l'intensité du courant, la tension et la vitesse d'avance du fil.

Les fils-électrodes existent en plusieurs diamètres normalisés, généralement compris entre 0,6 mm et 2,4 mm, et sont disponibles sous différentes formes en fonction de leur composition et de leur domaine d'application. [78]

Pour être efficace, le métal d'apport doit répondre à plusieurs exigences : Messer

- Compatibilité avec le métal de base : Il doit s'allier facilement avec le matériau à souder et bien se diffuser dans la zone de fusion ;
- Absence de réaction indésirable : Il ne doit pas provoquer de corrosion ou d'altération des propriétés du métal de base ;
- Température de fusion adaptée : Elle doit être en adéquation avec les caractéristiques du matériau soudé pour garantir une fusion homogène ;
- Propriétés mécaniques et physiques adéquates : Une fois solidifié, il doit offrir la résistance et la durabilité nécessaires à la pièce soudée ;

Le choix du métal d'apport constitue donc un facteur déterminant pour garantir la fiabilité et la durabilité de la soudure. [79]

II.8.2. Différents types de fils-électrodes en soudage MIG/MAG

Il existe plusieurs types de fils-électrodes, classés selon leur structure, leur composition chimique et leur domaine d'application.

II.8.2.5. Fil plein

Le fil plein est le type de fil-électrode le plus largement utilisé en soudage MIG/MAG. Il se présente sous la forme d'un fil métallique solide, généralement revêtu d'une fine couche de cuivre pour améliorer la conductivité électrique et prévenir l'oxydation lors du stockage.

Il est adapté au soudage de l'acier ordinaire, de l'acier inoxydable ainsi que de l'aluminium sous protection gazeuse. [80]

La figure II.38 illustre la bobine de fil plein.



Figure II. 38. Bobin de fil plein

II.8.2.6. Fil fourré

Le fil fourré est un fil creux dont l'intérieur est rempli d'un flux pulvérulent, ce flux améliore la stabilité de l'arc électrique, réduit les projections, facilite le soudage dans des positions difficiles et améliore les propriétés mécaniques du cordon.

Il existe deux variantes principales :

- Fil fourré à laitier rutile : offre une bonne stabilité de l'arc et une facilité d'utilisation. Il est adapté aux applications courantes en position à plat et en angle ;
- Fil fourré à laitier basique : Il présente de meilleures propriétés mécaniques ainsi qu'une meilleure résistance à la fissuration à chaud. Il est recommandé pour les applications exigeant une résistance mécanique élevée ; [81]

La figure II.39 illustre la bobine de fil fourré.



Figure II. 39. Bobine de fil fourré

II.8.2.7. Fil fourré auto-protégé

Le fil fourré auto-protégé ne nécessite pas de gaz de protection externe.

Le flux incorporé dans le fil produit, lors de sa fusion, les gaz de protection nécessaires, ce qui rend ce procédé particulièrement adapté aux travaux en extérieur ou dans des environnements ventilés, où l'utilisation d'un gaz de protection externe est difficile. [82]

II.8.2.8. Fil aluminium

Le fil d'aluminium est spécialement conçu pour le soudage des alliages d'aluminium. En raison de sa faible rigidité et de sa sensibilité à l'oxydation, son alimentation dans la torche requiert des précautions particulières, notamment l'utilisation d'une gaine guide en téflon afin de limiter les déformations et les risques de bourrage. [83]

La figure II.40 illustre la bobine de fil électrode en aluminium.



Figure II. 40. Bobine de fil électrode en aluminium

II.8.2.9. Fil inoxydable

Le fil inoxydable est utilisé pour le soudage des aciers inoxydables austénitiques, ferritiques et martensitiques.

Sa composition chimique doit être rigoureusement sélectionnée en fonction de la nuance d'acier inoxydable à souder, afin d'assurer la résistance à la corrosion ainsi que les propriétés mécaniques du joint soudé. [84]

II.8.3. Précautions d'utilisation des fils-électrodes en soudage MIG/MAG

L'utilisation correcte des fils de soudage est essentielle pour garantir la stabilité de l'arc électrique et la qualité du cordon de soudure.

II.8.4. Précautions d'utilisation des fils de soudage

- Les fils de soudage doivent être stockés dans un endroit sec, à l'abri de l'humidité, afin d'éviter toute oxydation ou contamination de leur surface ;
- Lors de l'installation de la bobine de fil, veiller à ce que le fil soit correctement guidé dans la gaine-guide du dévidoir, sans torsion ni courbure excessive ;
- La pression exercée par les galets d'entraînement du dévidoir sur le fil doit être soigneusement ajustée ;
- La gaine-guide et le tube contact doivent être adaptés au diamètre du fil utilisé ;
- La surface du fil-électrode ainsi que la surface de la pièce à souder doivent être exemptes de toute trace d'huile, de graisse ou de rouille ;
- Le fil de soudage doit être utilisé dans la plage des paramètres recommandée par le fabricant ;

Tout manquement à ces précautions peut engendrer des défauts dans le cordon de soudure.

II.9. Rôle des gaz de protection

En soudage MIG/MAG, le choix et l'utilisation des gaz de protection sont essentiels pour garantir la qualité de la soudure.

Ces gaz empêchent l'oxydation du bain de fusion et assurent un arc électrique stable, évitant ainsi les défauts tels que la porosité ou la contamination métallique.

Le gaz de protection joue trois rôles essentiels : il protège le bain de fusion des gaz atmosphériques tels que l'oxygène, l'azote et la vapeur d'eau, il influence les caractéristiques de l'arc, et il a un impact sur la profondeur de pénétration et l'apport de chaleur.

La principale différence entre les procédés MIG et MAG réside dans la nature du gaz de protection utilisé : inerte dans le cas du MIG et actif chimiquement dans le cas du MAG. [85]

L'utilisation des gaz de protection en soudage MIG/MAG se divise en trois niveaux, chacun ayant un rôle spécifique dans le processus de soudage.

La figure II.41 illustre la bouteille de gaz de protection.

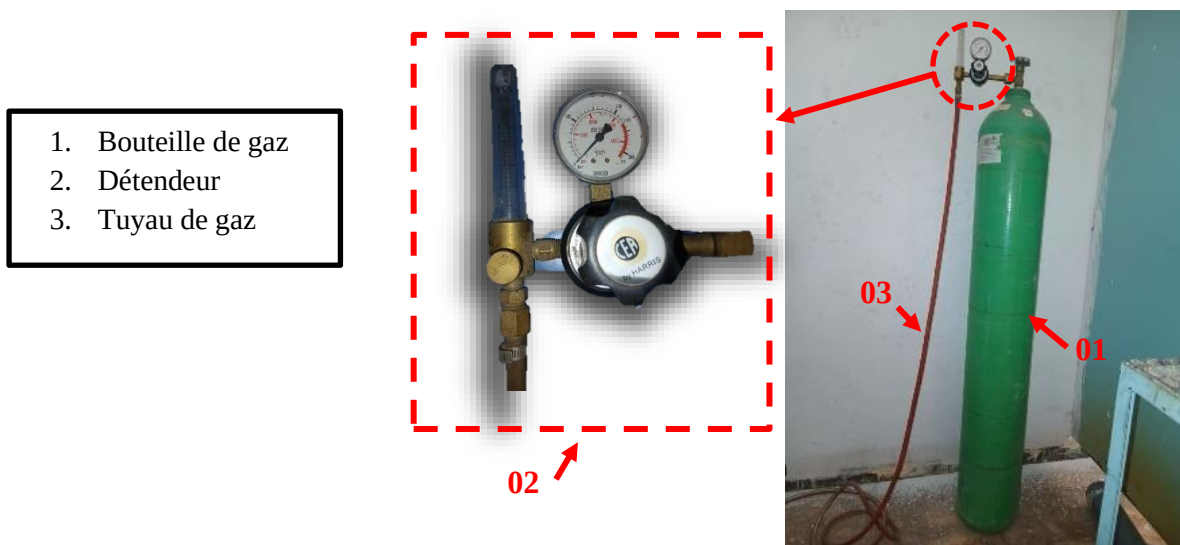


Figure II. 41. Bouteille de gaz de protection

II.9.2. Modes d'utilisation du gaz de protection

II.9.2.5. Protection primaire (protéger le bain de fusion)

La protection primaire est assurée par le gaz qui s'écoule de la torche autour de l'arc électrique et du bain de fusion. Elle empêche le contact entre le métal fondu et l'oxygène, l'azote ou l'humidité de l'air.

Gaz utilisés en MIG : Au MIG on soude principalement l'aluminium et le cuivre avec un gaz argon pur. Le gaz inerte a pour fonction principale de neutraliser l'atmosphère environnante sans intervenir chimiquement dans le bain de fusion. Il peut être additionné d'hélium (He) afin d'améliorer la pénétration ainsi que la fluidité du bain de fusion. [86]

Gaz utilisés en MAG : Le mélange argon + 15 à 20 % de CO₂ représente le meilleur choix pour le soudage des aciers non alliés carbone-manganèse. En MAG, le CO₂ se décompose dans l'arc électrique en oxygène et carbone. Le carbone contribue à limiter la décarburation de la zone fondue,

tandis que l'oxygène réagit avec le fer en libérant de l'énergie sous forme de chaleur, ce qui améliore la pénétration, le mouillage ainsi que la fluidité du bain de fusion. [87]

La figure II.42 illustre la procédure de démarrage de l'arc.

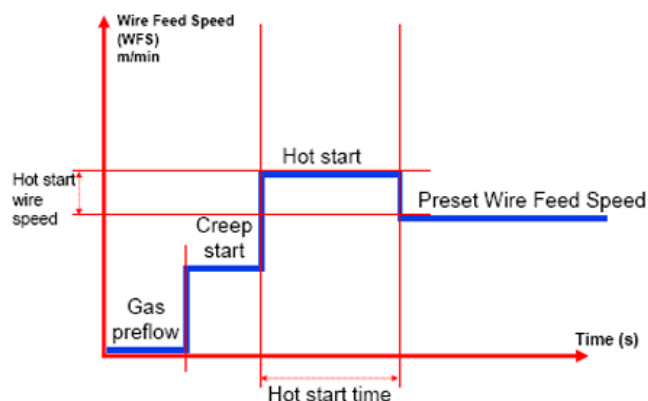


Figure II. 42. Procédure de démarrage de l'arc [88]

II.9.2.6. Protection envers (protection de la racine de la soudure)

Lors du soudage de pièces métalliques, notamment les tubes et les tôles fines, la face opposée au cordon de soudure (racine) est exposée à l'air ambiant et peut s'oxyder.

Afin d'éviter ce phénomène, une protection envers est réalisée par l'injection de gaz sous la pièce.

Gaz utilisés :

En MIG/MAG, l'argon est le gaz le plus utilisé pour la protection envers.

Dans certains cas spécifiques, il peut être mélangé à de petites quantités de CO₂ ou d'azote (N₂) afin d'améliorer certaines propriétés métallurgiques, notamment la résistance à la corrosion dans le cas des aciers inoxydables.

II.9.2.7. Protection secondaire (post gaz)

Après l'extinction de l'arc, le cordon reste chaud et vulnérable. La torche continue de diffuser du gaz pendant quelques secondes (post-gaz) afin de protéger le métal lors de son refroidissement.

Ce mécanisme est particulièrement important pour l'inox et les alliages sensibles à l'oxydation.

La quantité du débit de gaz de protection dépend du diamètre des buses de gaz et du flux d'air environnant, comme valeur indicative, en ce qui concerne l'argon, il est possible de partir d'un débit volumétrique de 5 à 10 l/min. Dans les espaces exposés aux courants d'air, des débits plus grands sont nécessaires.

Ce flux prolongé de gaz de protection permet de prévenir la dégradation du cordon de soudure durant sa phase de refroidissement, notamment dans le cas de matériaux sensibles tels que l'acier inoxydable. [89]

La figure II.43 illustre l'évolution de la vitesse de dévidage lors de la fin du soudage.

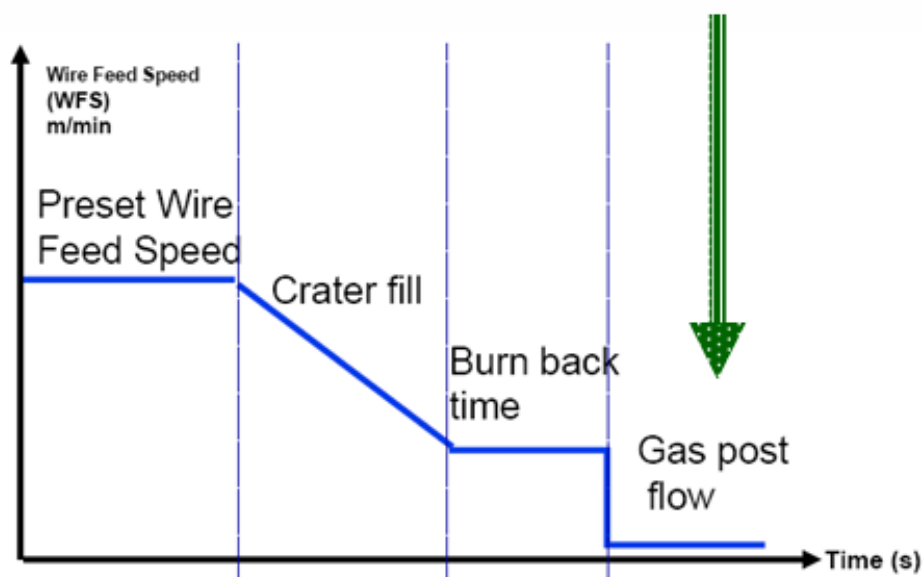


Figure II. 43. Évolution de la vitesse de dévidage lors de la fin de soudage [90]

II.9.3.Choix des gaz selon l'application

Le type de gaz utilisé en MIG/MAG dépend du matériau à souder et de l'effet recherché :

Le tableau ci-dessous présente une comparaison des gaz de protection utilisés en soudage MIG/MAG.

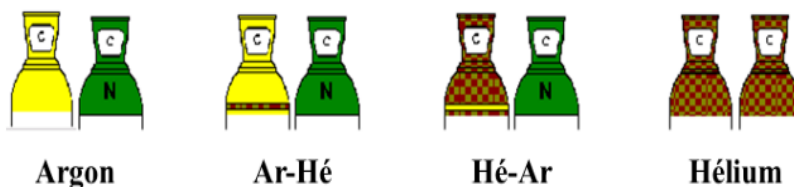
Tableau II. 10. Comparatif des gaz de protection en soudage MIG/MAG

Gaz	Composition	Avantages	Inconvénients	Applications
Argon pur (Ar)	100 % Argon	Arc chaud et stable	Coût élevé	Métaux non ferreux
Argon + CO₂	75/25 80/20 90/10	Bon compromis stabilité / pénétration	—	Soudage MIG de l'acier
Argon + Oxygène	Ar + faible % O ₂	Beau cordon, bonne résistance à la corrosion, oxydation minimale	—	Acier inoxydable (procédé MAG)
CO₂ pur	100 % CO ₂	Pénétration profonde, coût réduit	Projections élevées, arc instable	Soudage acier courant
Argon + Hélium	Ar + He (% variable)	Arc énergétique, meilleure pénétration, vitesse de soudage accrue	Coût élevé (hélium)	Matériaux épais, applications spéciales

Les types de gaz ainsi que leurs débits varient en fonction du procédé de soudage utilisé (MIG ou MAG) et de la nature du métal à souder.

La figure II.44 illustre les Types de gaz de protection utilisés en soudage MIG/MAG.

- Les gaz employés en **MIG**: 18l/min à 25 l/min



- Les gaz employés en **MAG**: 12 l/min à 18 l/min

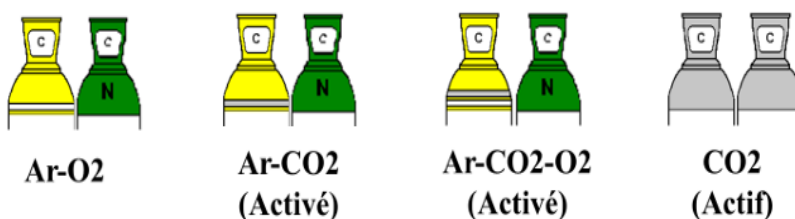


Figure II. 44. Types de gaz de protection utilisés en soudage MIG/MAG [91]

II.9.4. Alimentation en gaz de protection

Dans le soudage MIG/MAG, c'est le gaz de protection (inerte ou actif) qui protège le bain de fusion de l'oxydation produite par l'air ambiant.

Le système d'alimentation en comprend :

- Une bouteille sous pression contenant le gaz ou le mélange gazeux ;
- Un détendeur-débitmètre pour régler la pression et le débit ;
- Un flexible acheminant le gaz jusqu'à la torche ;

La figure II.45 illustre le schéma explicatif de l'alimentation de la bouteille de gaz.

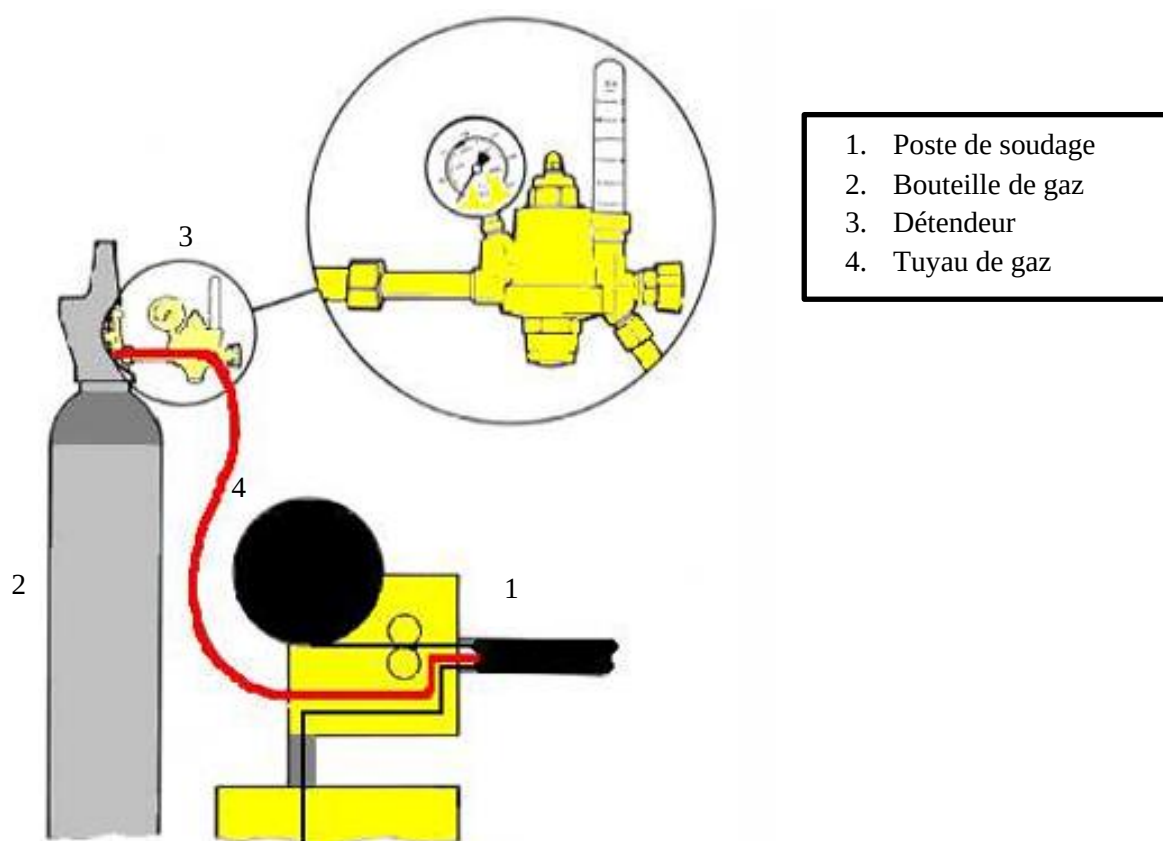


Figure II. 45. Schéma explicatif d'alimentation du bouteille gaz [92]

Chapitre III

Module développé

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, python est utilisé pour développer un module dans un environnement CAW afin de déterminer les paramètres optimaux pour le soudage MIG/MAG, en fonction de plusieurs facteurs.

III.2. Présentation du logiciel

Python est un langage de programmation polyvalent en open source, créé par Guido van Rossum en 1991.

Il est aujourd'hui considéré comme l'un des langages de programmation les plus répandus au monde, permettant aux utilisateurs de développer des applications dans des domaines très variés.

Python convient aussi bien aux débutants qu'aux professionnels, grâce à sa syntaxe claire et intuitive.

Il facilite l'analyse de données, le développement de sites web, l'automatisation des tâches, ainsi que la création d'applications d'intelligence artificielle et de simulation scientifique.

III.3. Principales fonctions

L'application contient deux calculateurs de paramètres : l'un rapide et l'autre indépendant,

Les principales fonctions sont :

- Métal d'apport ;
- Gaz de protection ;
- Débit de gaz ;
- Diamètre du fil ;
- Tension ;
- Vitesse de soudage ;
- Polarité ;
- Nombre de passes ;
- Distance bec-pièce (CTWD) ;
- Température de préchauffage ;
- Fiches techniques des postes de soudage MIG/MAG ;

III.4. Présentation du module

III.4.1. Fenêtre de présentation de l'application

L'écran de la figure III.46 présente l'interface du module développé sous Python.



Figure III. 47. Interface du module développé.

- Cliquez sur le bouton  pour ouvrir l'application.
- Cliquez sur le bouton  pour la fermeture de l'application.

III.4.2. Fenêtre de connexion à l'application

L'écran de la figure III.47 présente l'interface de connexion.

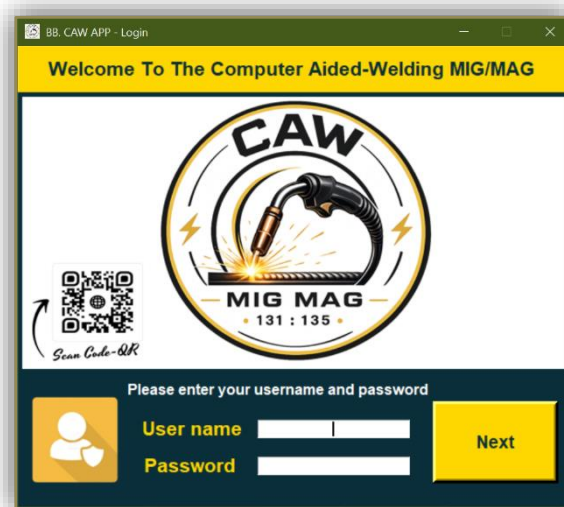


Figure III. 48. Fenêtre de connexion de l'application

Saisissez le nom d'utilisateur (User name) et le mot de passe (Password) dans les champs correspondants,

- Cliquez sur le bouton  pour vous connecter.

III.4.3. Fenêtre principale de l'application

L'écran de la figure III.48 présente l'interface principale de l'application.

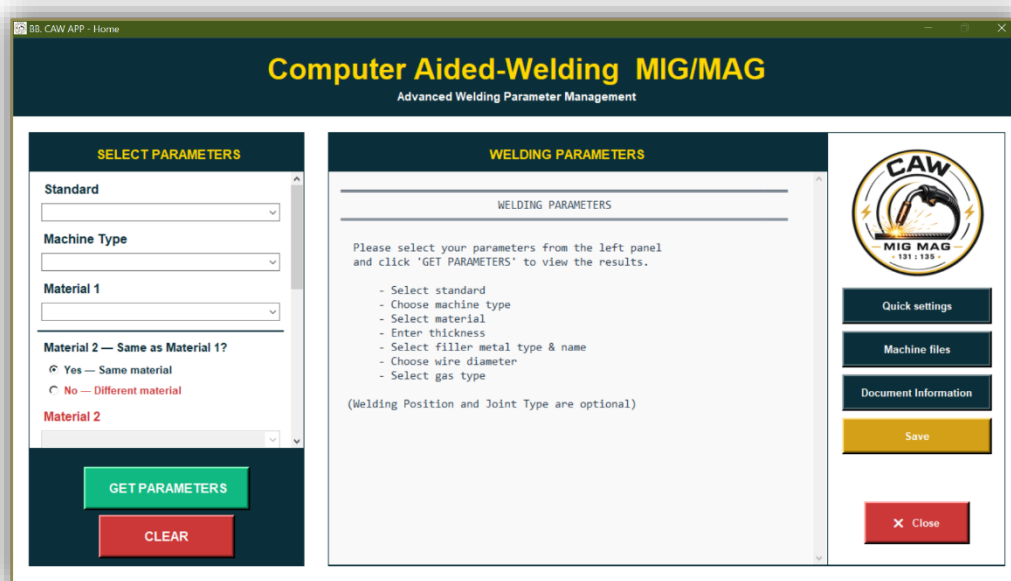


Figure III. 49. Interface principale de l'application.

III.5. Description de l'application

L'application contient 3 cadres principaux :

III.5.1. Cadre de configuration

L'écran de la figure III.49 présente le panneau de sélection des paramètres d'entrée.

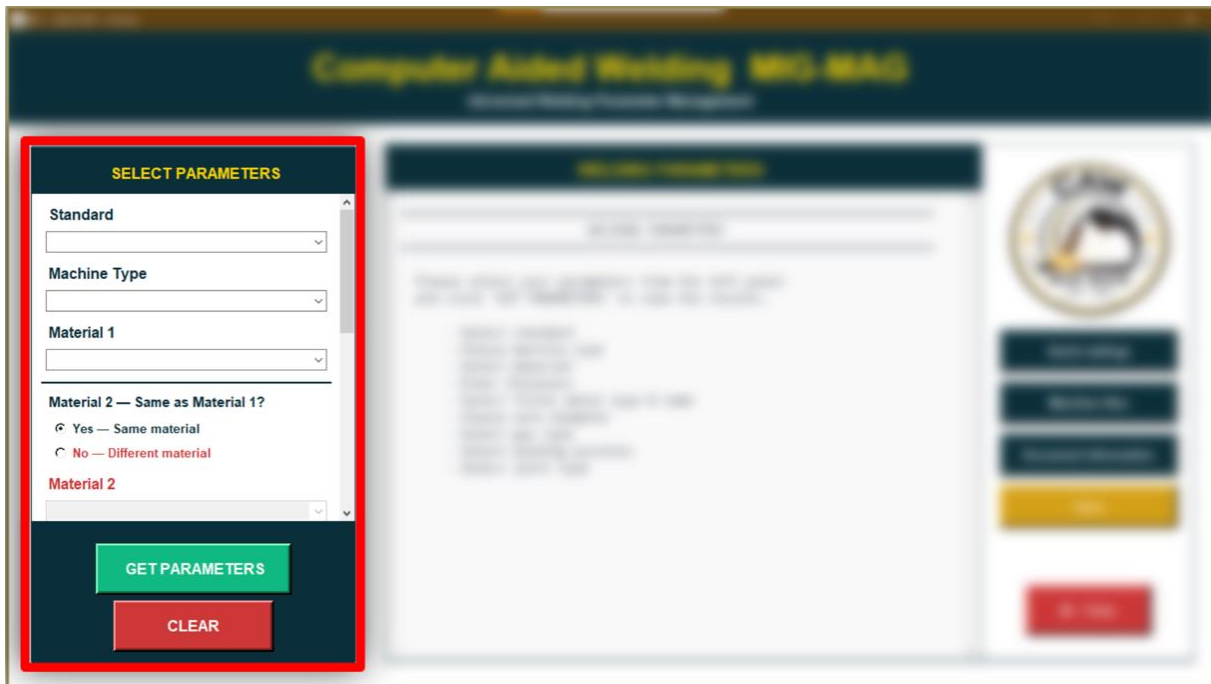


Figure III. 50. Panneau de sélection des paramètres d'entrée

Le tableau ci-dessous présente la traduction des boutons et des champs de saisie qui influencent les paramètres de soudage, à savoir :

L'écran de la figure III.50 présente les paramètres d'entrée.

Tableau III.11. Traduit les mots des Paramètres d'entrée

SELECT PARAMETERS	Français	Anglais
Standard		
Machine Type	Norme	Standard
Material 1	Type de machine	Machine Type
Grade Category	Matériau 1	Material 1
Grade / Nuance	Catégorie de nuance	Grade Category

Material 2 — Same as Material 1?

☒ Yes — Same material

☐ No — Different material

Material 2

Thickness

Filler Metal Type

Filler Metal Name

Wire Diameter

Gas Type

Welding Position

Joint Type

GET PARAMETERS

CLEAR

Figure III. 51. Paramètres d'entrée

Nuance	Grade / Nuance
Matériau 2 — Identique au matériau 1 ?	Material 2 — Same as Material 1 ?
Matériau 2	Material 2
Épaisseur	Thickness
Type de métal d'apport	Filler Metal Type
Désignation du métal d'apport	Filler Metal Name
Diamètre du fil	Wire Diameter
Type de gaz	Gas Type
Position de soudage	Welding Position
Type d'assemblage	Joint Type
Obtenir les paramètres	GET PARAMETERS
Effacer	CLEAR

III.5.2. Cadre des résultats de soudage

Le deuxième cadre est une zone de texte qui affiche les résultats du soudage ou des remarques pour aider l'utilisateur à utiliser l'application.

L'écran de la figure III.51 présente le panneau d'affichage des paramètres de soudage.

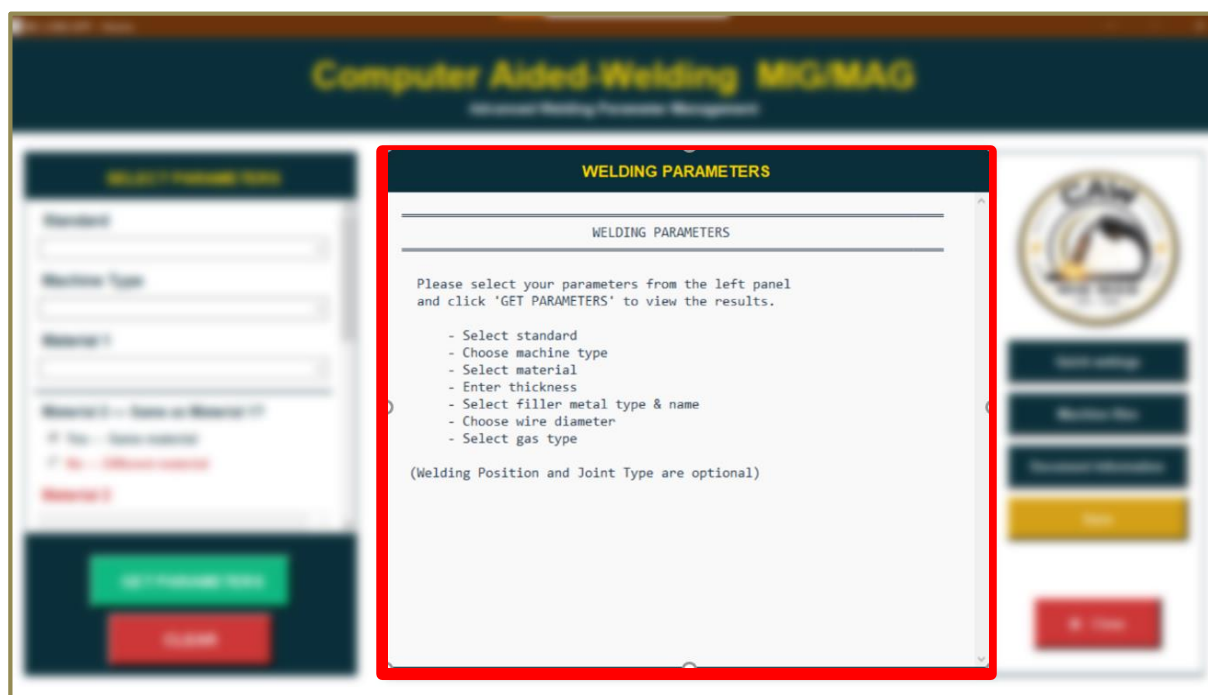


Figure III. 52. Panneau d'affichage des paramètres de soudage

III.5.3. Cadre des commandes rapides

L'écran de la figure III.52 présente le panneau des commandes rapides.



Figure III. 53. Panneau des commandes rapides

Le troisième cadre contient un ensemble de boutons et le logo de l'application.

Le tableau ci-dessous présente la traduction des boutons, à savoir :

Tableau III.12. Traduction des mots du panneau des commandes rapides

Français	Anglais
Paramètres rapides	Quick setting
Fichiers de la machine	Machine files
Informations sur le document	Document information
Enregistrer	Save
Fermer	Close

III.6. Fonctionnement de l'application

Il existe deux méthodes pour calculer les paramètres :

III.6.1. Calculateur principal

La première méthode consiste à saisir les données dans le champ (SELECT PARAMETERS) puis à cliquer sur le bouton (GET PARAMETERS) pour que le résultat s'affiche dans le champ (WELDING PARAMETERS).

L'écran de la figure III.53 présente le calculateur principal.

Figure III. 54. Calculateur principal

III.6.1.1. Exemple de calcul

- Choisissez le type de norme.

L'écran de la figure III.54 présente la liste des normes de soudage.

Standard

Figure III. 55. Liste de la norme de soudage

- Choisissez le nom de la machine à souder.

La figure III.55 présente la liste de sélection du type de machine de soudage.

Machine Type

Figure III. 56. Liste de sélection du type de machine de soudage

- Choisissez le type de métal à souder.

L'écran de la figure III.56 présente la liste de sélection du matériau de base (Material 1).

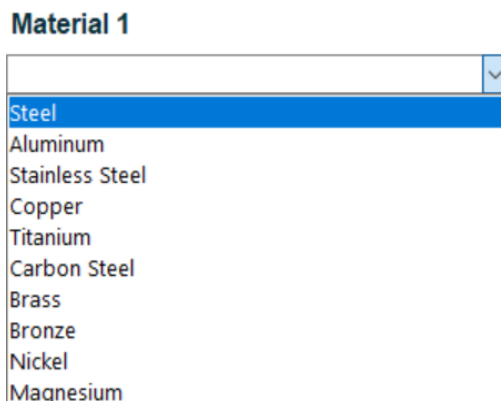


Figure III. 57. Liste de sélection du matériau de base (Material 1)

L'écran de la figure III.57 présente la boîte de dialogue de sélection de la nuance du matériau.

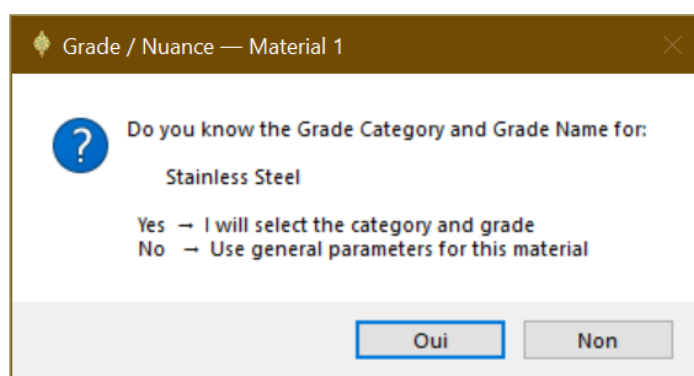


Figure III. 58. Boîte de dialogue de sélection de la nuance du matériau

- Cliquez sur le bouton si vous ne connaissez pas le type et grade du matériau.
- Cliquez sur le bouton si vous connaissez le type et grade du matériau.

L'écran de la figure III.58 présente les champs de sélection de la catégorie et de la nuance du matériau.

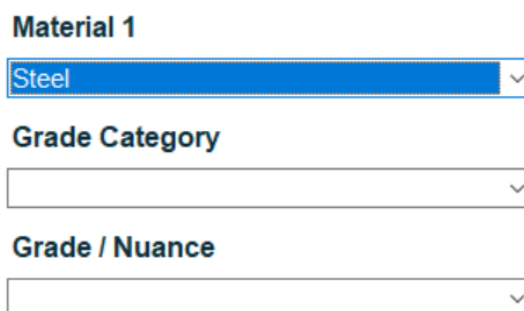


Figure III. 59. Champs de sélection de la catégorie et de la nuance du matériau

- Choisissez parmi les suggestions de grade disponibles.

L'écran de la figure III.59 présente la liste des catégories de nuances pour l'acier.

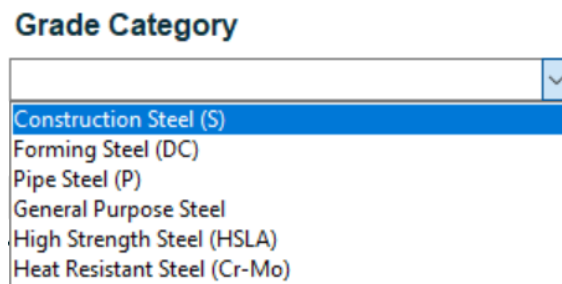


Figure III. 60. Liste des catégories de nuances pour l'acier

- Choisissez parmi les nuances proposées.

L'écran de la figure III.60 présente la liste des nuances d'acier de construction.

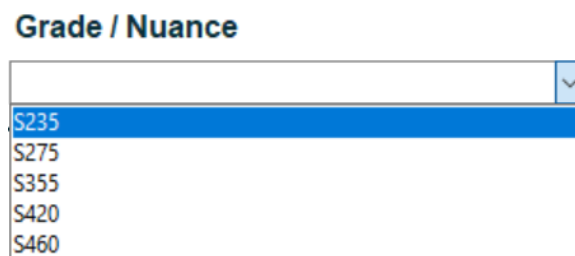


Figure III. 61. Liste des nuances d'acier de construction

- En cliquant sur « », le grade et la nuance ne s'affichent pas.

L'écran de la figure III.61 présente l'interface sans affichage de la nuance.

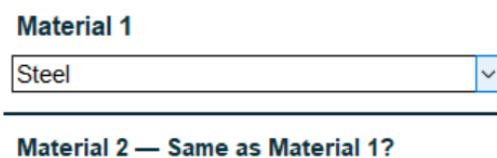


Figure III. 62. Interface sans affichage de la nuance

- Choisissez si vous souhaitez souder le même métal ou un métal différent.

L'écran de la figure III.62 présente la sélection du type de soudage.

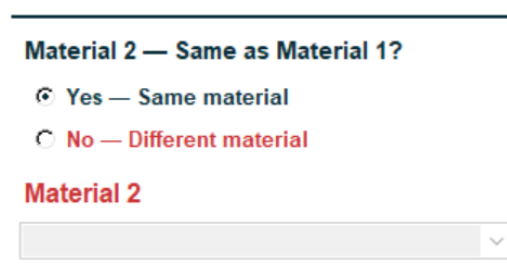


Figure III. 63. Sélection du type de soudage

- Cliquez sur le bouton « ☒ Yes » si vous souhaitez souder le même métal.
- Cliquez sur le bouton « ☐ No » si vous souhaitez souder deux métaux différents.

L'écran de la figure III.63 présente la liste de sélection du deuxième matériau en cliquant sur le bouton « ☐ No », .

Material 2 — Same as Material 1?

☐ Yes — Same material

☒ No — Different material

Material 2

Steel
Aluminum
Stainless Steel
Copper
Titanium
Carbon Steel
Brass
Bronze
Nickel
Magnesium

Figure III. 64. Liste de sélection du deuxième matériau

L'écran de la figure III.64 présente le champ du deuxième matériau désactivé en cliquant sur le bouton « ☒ Yes ».

Material 2 — Same as Material 1?

☒ Yes — Same material

☐ No — Different material

Material 2

Figure III. 65. Champ du deuxième matériau désactivé

- Choisissez l'épaisseur de la pièce.

L'écran de la figure III.65 présente la liste déroulante pour choisir l'épaisseur de la pièce à souder.



Figure III. 66. Liste déroulante pour choisir l'épaisseur de la pièce à souder

- Choisissez le type de métal d'apport.

L'écran de la figure III.66 présente la liste de sélection du type de métal d'apport.

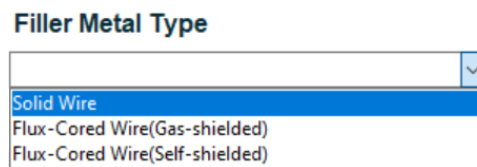


Figure III. 67. Liste de sélection du type de métal d'apport

- Choisissez le numéro du métal d'apport, par exemple pour l'acier (fer).

L'écran de la figure III.67 présente la liste de sélection du nom du métal d'apport.

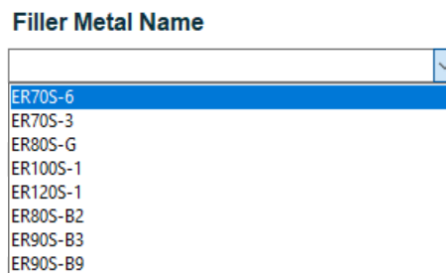


Figure III. 68. Liste de sélection du nom du métal d'apport

- Choisissez le diamètre du fil.

L'écran de la figure II.68 présente la sélection du diamètre du fil avec suggestion automatique.

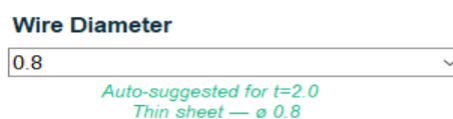


Figure III. 69. Sélection du diamètre de fil avec suggestion automatique

- Choisissez le type de gaz de protection.

L'écran de la figure III.69 présente la liste déroulante du gaz de protection.

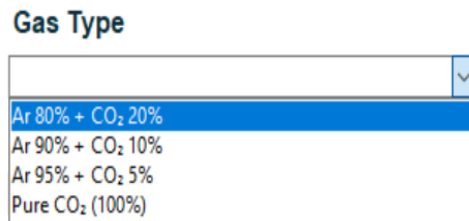


Figure III. 70. Liste déroulante du gaz de protection

- Choisissez la position de soudage.

L'écran de la figure III.70 présente la sélection de la position de soudage

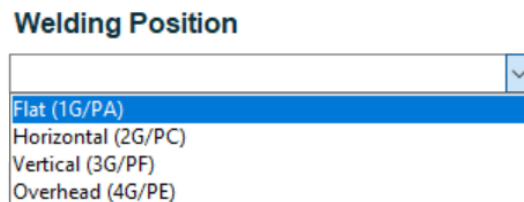


Figure III. 71. Sélection de la position de soudage

- Choisissez le type de joint.

L'écran de la figure III.70 présente la sélection de la position de soudage

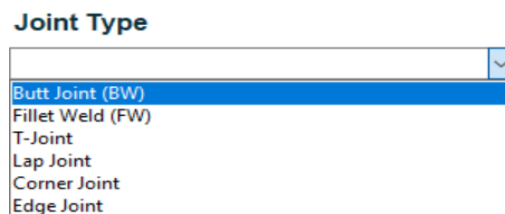


Figure III. 72. Sélection du type de joint

- Cliquez sur le bouton  pour afficher les paramètres.

Les paramètres de soudage s'affichent dans le cadre des résultats.

L'écran de la figure III.72 présente l'affichage des résultats des paramètres de soudage.

WELDING PARAMETERS	
WELDING PARAMETERS RESULTS – ISO 15614-1	
INPUT PARAMETERS:	
Standard	: ISO 15614-1
Machine Type	: Lincoln Power MIG 256
Welding Method	: MIG/MAG
Material	: Steel
Grade Category	: Construction Steel (S)
Grade / Nuance	: S355
Thickness	: 5.0 mm
Filler Metal Type	: Solid Wire
Filler Metal	: ER70S-6
Wire Diameter	: 1.0 mm
Gas Type	: Ar 80% + CO ₂ 20%
Welding Position	: Flat (1G/PA)
Joint Type	: Fillet Weld (FW)
MACHINE SPECIFICATIONS – Lincoln Power MIG 256 :	
Max Current	: 256 A
Input Voltage	: 120-240V
60% Duty Cycle	: 200 A
100% Duty Cycle	: 150 A
ADJUSTED PARAMETERS – ISO 15614-1 :	
Voltage	: [17.6 – 25.0] V
Wire Feed Speed	: [3.87 – 7.48] m/min
Travel Speed	: [15.3 – 30.5] cm/min
Gas Flow Rate	: 15.8 L/min
Polarity	: DCEP (DC+)
CTWD	: [10-15] mm
Number of Passes	: 1-2 passes
IMPORTANT NOTES:	
• Wear leather gloves. • Wear a welding helmet with appropriate opacity. • Wear a cotton or leather welding jacket or vest. • Wear safety shoes with steel toe caps. • Wear a respirator to avoid welding fumes. • Wear earplugs in noisy environments. • Wear safety goggles under your helmet when cleaning. • Ensure the area is well-ventilated before starting. • Use a welding screen or curtain to protect colleagues. • Keep flammable materials away from the work area.	
Generated	: 2026-05-09 19:29:47
Operator	: BOUZIANE Bilal
System	: CAW MIG-MAG APP

Figure III. 73. Affichage des résultats des paramètres de soudage

Le rapport contient un ensemble d'informations, à savoir : les données saisies, les informations de la machine de soudage et les paramètres qui incluent la tension, la vitesse du fil, la vitesse de soudage, le type de gaz de protection, la polarité, la distance entre la torche de soudage et la pièce, le nombre de passes de soudage, ainsi que le débit du gaz.

Le rapport contient également des consignes de sécurité.

Dans le cas du soudage de deux matériaux différents, le même rapport s'affiche, avec uniquement l'ajout du pourcentage de difficulté de soudage.

Exemple :

Weld Difficulty : HARD

III.6.1.2. Informations incorrectes

L'écran de la figure III.73 affiche un message d'erreur lors de la saisie d'informations incomplètes.

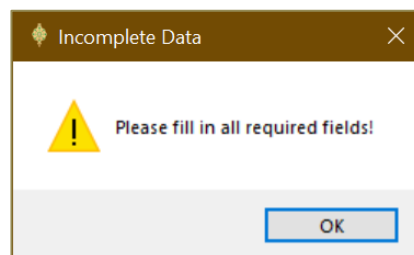


Figure III.75. Message d'erreur

L'écran de la figure III.74 présente la liste des champs obligatoires affichés dans le rapport d'avertissement.

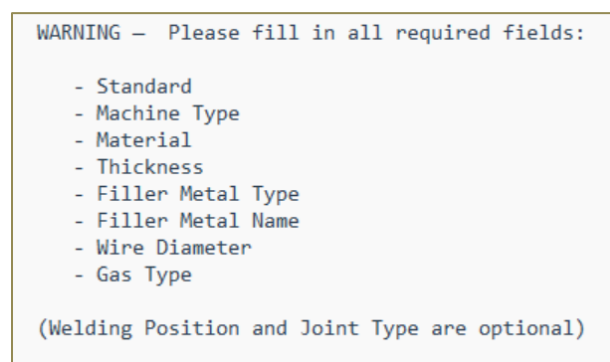


Figure III. 76. Liste des champs obligatoires affichée dans le rapport d'avertissement

III.6.1.3. Suppression des informations

L'écran de la figure III.75 présente la réinitialisation des champs en cliquant sur

CLEAR

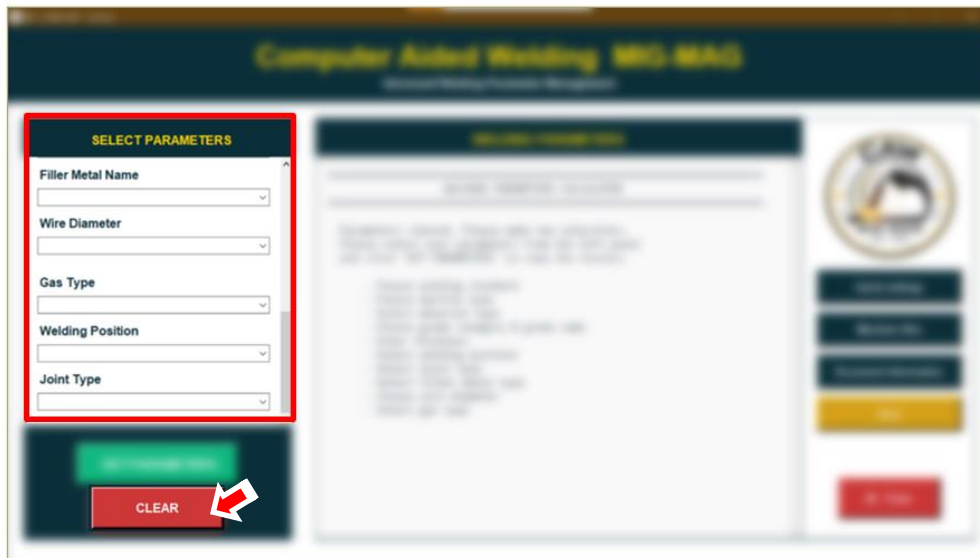


Figure III. 77. Réinitialisation des champs de saisie via le bouton clear

III.6.2. Paramètres rapides

L'écran de la figure III.76 présente la fenêtre paramètres rapides en cliquant sur

Quick settings

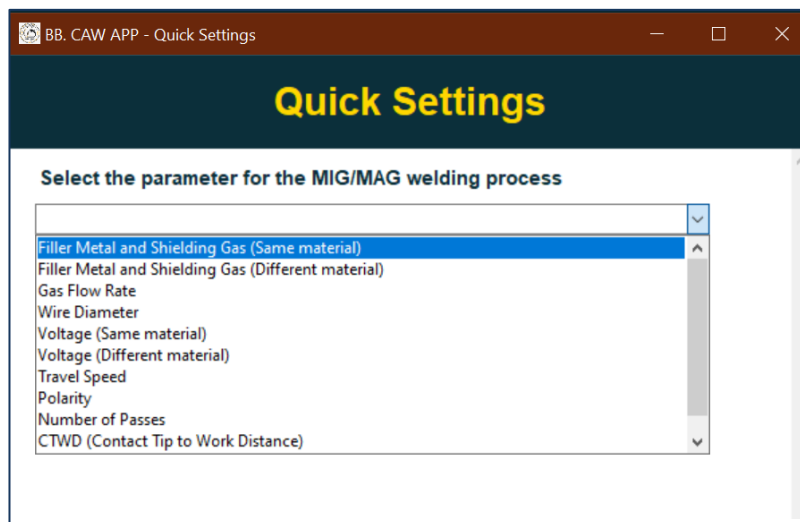


Figure III. 78. Fenêtre paramètres rapides

- Choisissez un paramètre dans la liste.

L'écran de la figure III.77 présente la liste des paramètres disponibles dans les “ paramètres rapides ”.

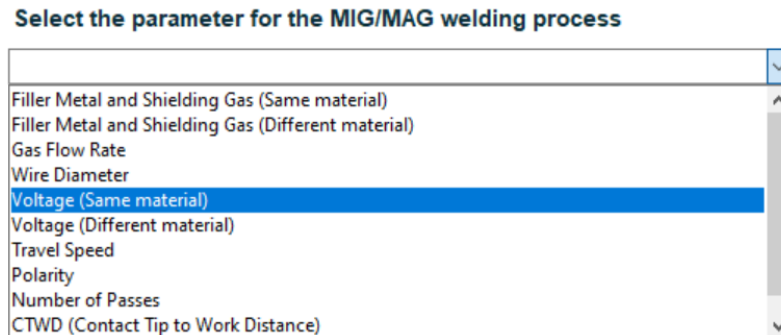


Figure III. 79. Paramètres disponibles dans paramètres rapides

III.6.2.1. Métal d'apport et gaz de protection (mêmes matériaux)

- Sélectionnez **Filler Metal and Shielding Gas (Same material)** dans la liste.

L'écran de la figure III.78 présente l'interface de calcul du métal d'apport et du gaz de protection pour le même matériau.

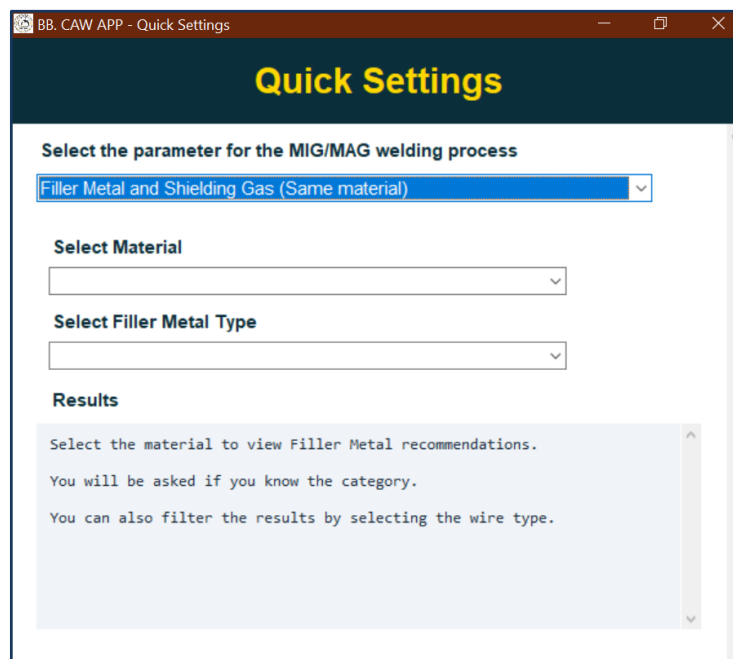


Figure III. 80. Interface de calcul du métal d'apport et du gaz de protection (même matériau)

- Choisissez le matériau à souder.

L'écran de la figure III.79 présente l'affichage des recommandations du métal d'apport après sélection du matériau.

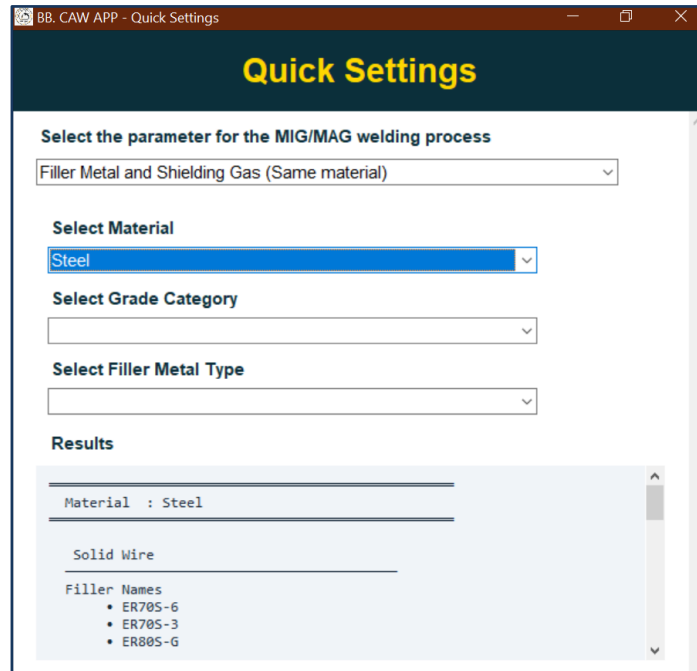


Figure III. 81. Affichage des recommandations du métal d'apport après sélection du matériau

L'écran de la figure III.80 présente la boîte de dialogue de confirmation de la catégorie de nuance en choisissant le matériau à souder.

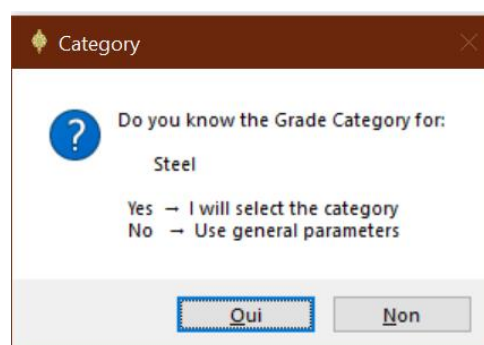


Figure III. 82. Boîte de dialogue de confirmation de la catégorie de nuance

- Cliquez sur le bouton si vous ne connaissez pas le grade du matériau.
- Cliquez sur le bouton si vous connaissez le grade du matériau.

Les résultats peuvent également être filtrés en choisissant le type de fil.

L'écran de la figure III.81 présente la sélection du type de métal d'apport pour filtrer les résultats.

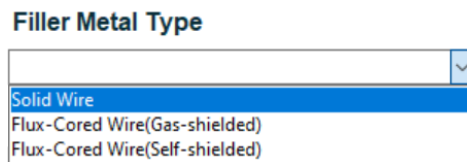


Figure III. 83 . Sélection du type de métal d'apport pour filtrer les résultats

Exemple : Choisir le matériau acier.

L'écran de la figure III.82 présente les résultats filtrés par type de fil.

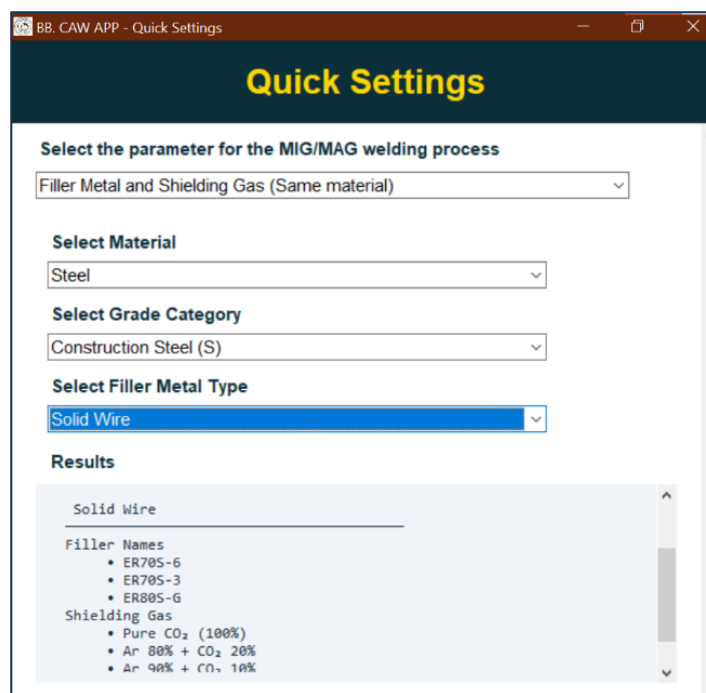


Figure III. 84 .Résultats filtrés par type de fil

III.6.2.2. Métal d'apport et gaz de protection (matériaux différents)

- Sélectionnez dans la liste.

L'écran de la figure III.83 présente l'interface de sélection du métal d'apport pour le soudage de matériaux dissemblables.

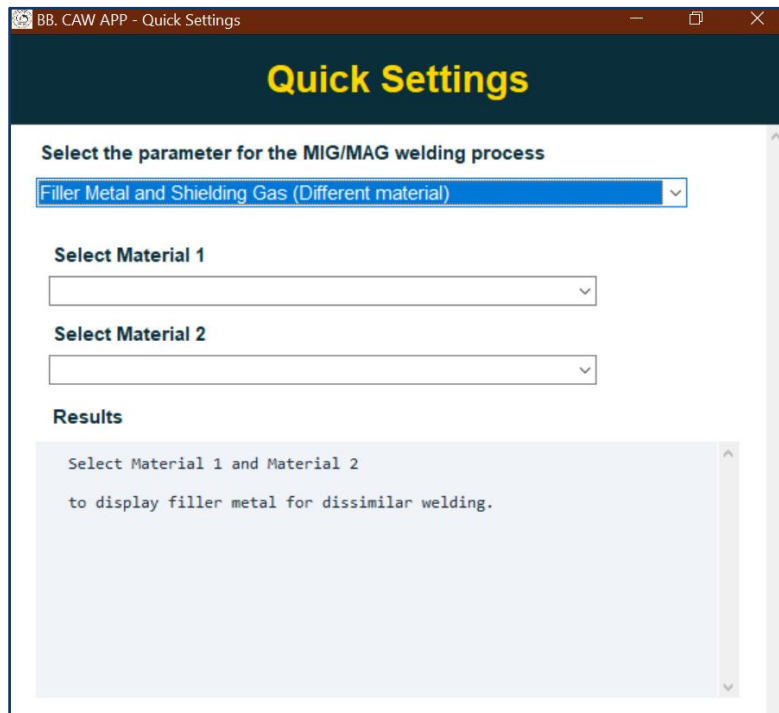


Figure III. 85. Interface de sélection du métal d'apport pour le soudage de matériaux dissimilaires

- Sélectionnez le matériau 1 et le matériau 2

L'écran de la figure III.84 présente les résultats du métal d'apport et du gaz de protection pour le soudage de matériaux dissimilaires.

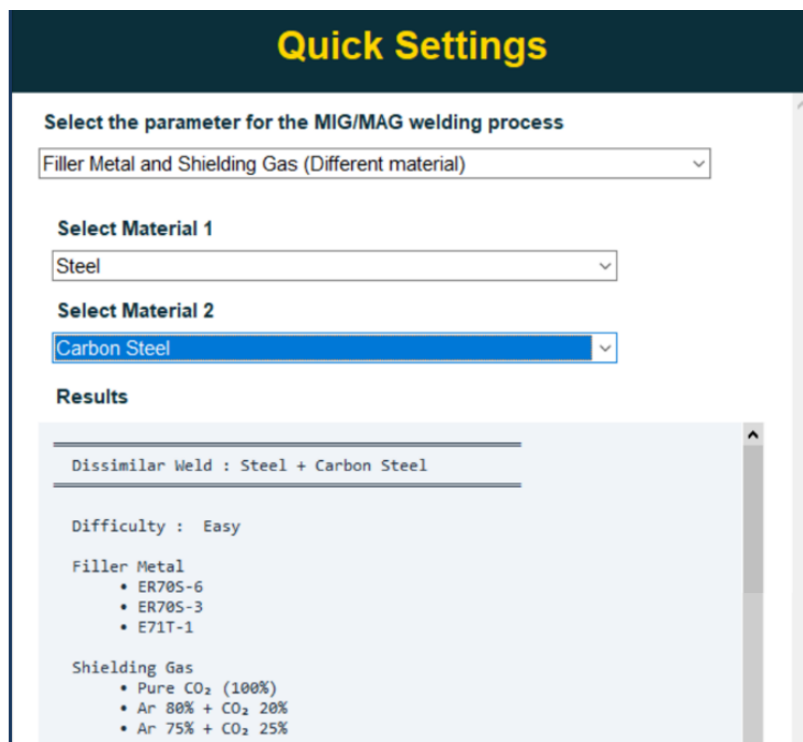


Figure III. 86. Résultats du métal d'apport et du gaz pour le soudage dissimilaire

III.6.2.3. Débit de gaz

- Sélectionnez **Gas Flow Rate** dans la liste.

L'écran de la figure III.85 présente l'interface de calcul du débit de gaz.

Figure III. 87. Interface de calcul du débit de gaz

- Sélectionnez l'épaisseur de la pièce soudée.

L'écran de la figure III.86 présente le résultat du débit de gaz de base.

Figure III. 88. Résultat du débit de gaz de base selon

- Choisissez le type de gaz de protection.

L'écran de la figure III.87 présente le résultat du débit de gaz ajusté selon le type de gaz de protection sélectionné.

Figure III. 89. Résultat du débit de gaz ajusté selon le type de gaz de protection sélectionné

III.6.2.4. Diamètre du fil

- Choisissez dans la liste.

L'écran de la figure III.88 présente l'interface de recommandation du diamètre de fil selon l'épaisseur.

Figure III. 90. Interface de recommandation du diamètre de fil selon l'épaisseur

- Sélectionnez l'épaisseur de la pièce soudée.

L'écran de la figure III.89 présente le résultat de la recommandation du diamètre de fil.

The screenshot shows the 'Quick Settings' window of the BB.CAW APP. The title bar reads 'BB.CAW APP - Quick Settings'. The main header is 'Quick Settings' in yellow. Below it, a section titled 'Select the parameter for the MIG/MAG welding process' contains a dropdown menu with 'Wire Diameter' selected. Another section titled 'Select Thickness' has a dropdown menu with '2.0' selected. The 'Results' section displays a table with the following data:

Thickness	: 2.0 mm
Recommended Wire	: ϕ 0.8 mm

Figure III. 91. Résultat de la recommandation du diamètre de fil

III.6.2.5. Tension (mêmes matériaux)

- Sélectionnez **Voltage (Same material)** dans la liste.

L'écran de la figure III.90 présente l'interface de calcul de la tension pour un matériau identique.

The screenshot shows the 'Quick Settings' window of the BB.CAW APP. The title bar reads 'BB.CAW APP - Quick Settings'. The main header is 'Quick Settings' in yellow. Below it, a section titled 'Select the parameter for the MIG/MAG welding process' contains a dropdown menu with 'Voltage (Same material)' selected. Below this, there are four more dropdown menus: 'Select Material', 'Select Thickness', 'Select Wire Diameter', and 'Select Filler Metal Type'. The 'Results' section displays the following text:

Select material, thickness and wire diameter
to display amperage & voltage ranges.

Figure III. 92. Interface de calcul de la tension pour un matériau identique

L'écran de la figure III.91 présente les résultats de la tension calculée.

BB. CAW APP - Quick Settings

Quick Settings

Select the parameter for the MIG/MAG welding process

Voltage (Same material) ▼

Select Material

Carbon Steel ▼

Select Thickness

1.5 ▼

Select Wire Diameter

0.6 ▼

Select Filler Metal Type

▼

Results

Material	: Carbon Steel
Thickness	: 1.5 mm
Wire Diameter	: 0.6 mm
Filler Type	: Solid Wire

VOLTAGE:

Range : 14.5 - 16.5 V

Best : 15.5 V

Figure III. 93. Résultats de la tension calculée

- Et lorsque vous ajoutez le type de métal d'apport aux données d'entrée, les paramètres changent.

L'écran de la figure III.92 présente la variation des résultats de la tension selon le type de métal d'apport sélectionné.

BB. CAW APP - Quick Settings

Quick Settings

Select the parameter for the MIG/MAG welding process

Voltage (Same material) ▼

Select Material

Carbon Steel ▼

Select Thickness

1.5 ▼

Select Wire Diameter

0.6 ▼

Select Filler Metal Type

Solid Wire ▼

Results

Material	: Carbon Steel
Thickness	: 1.5 mm
Wire Diameter	: 0.6 mm
Filler Type	: Solid Wire

VOLTAGE:

Range : 14.5 - 16.5 V

Best : 15.5 V

Figure III. 94. Variation des résultats de tension selon le type de métal d'apport sélectionné

III.6.2.6. Tension (matériaux différents)

- Sélectionnez **Voltage (Different material)** dans la liste.

L'écran de la figure III.93 présente l'interface de calcul de la tension pour le soudage de matériaux dissemblables.

Figure III. 95. Interface de calcul de la tension pour le soudage de matériaux dissimilaires

- Sélectionnez les deux matériaux et l'épaisseur afin d'afficher les recommandations de tension pour le soudage de matériaux dissemblables.

L'écran de la figure III.94 présente les résultats de tension pour le soudage de matériaux dissemblables.

Figure III. 96. Résultats de tension pour soudage dissimilaire

III.6.2.7. Vitesse de déplacement

- Sélectionnez **Travel Speed** dans la liste.

L'écran de la figure III.95 présente l'interface de calcul de la vitesse de soudage.

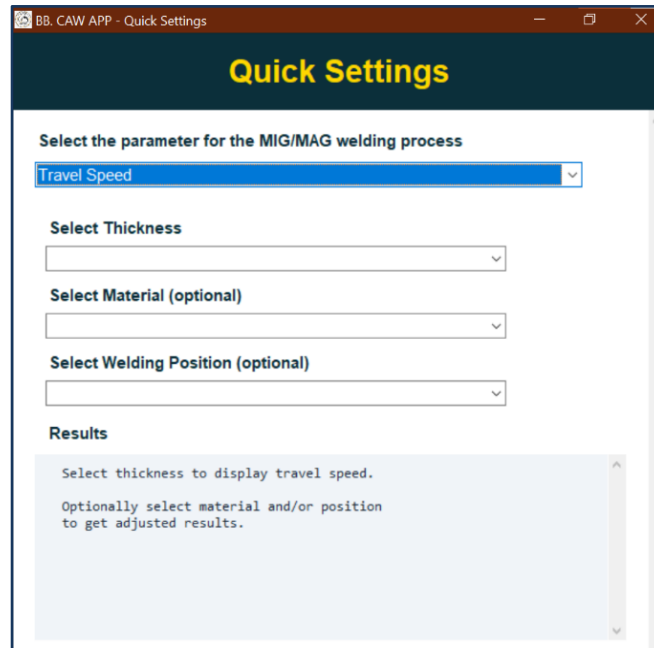


Figure III. 97. Interface de calcul de la vitesse de soudage

- Sélectionnez l'épaisseur pour afficher la vitesse de déplacement.

L'écran de la figure III.96 présente les résultats de la vitesse de soudage.

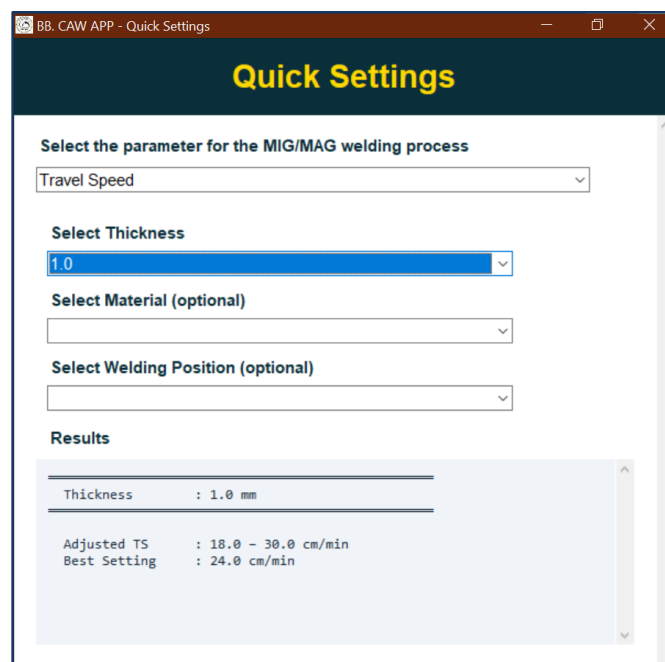


Figure III. 98. Résultats de la vitesse de soudage

- Choisir le matériau et ou la position afin d'obtenir des résultats ajustés.

L'écran de la figure III.97 présente l'influence du matériau et de la position de soudage sur la vitesse de soudage.

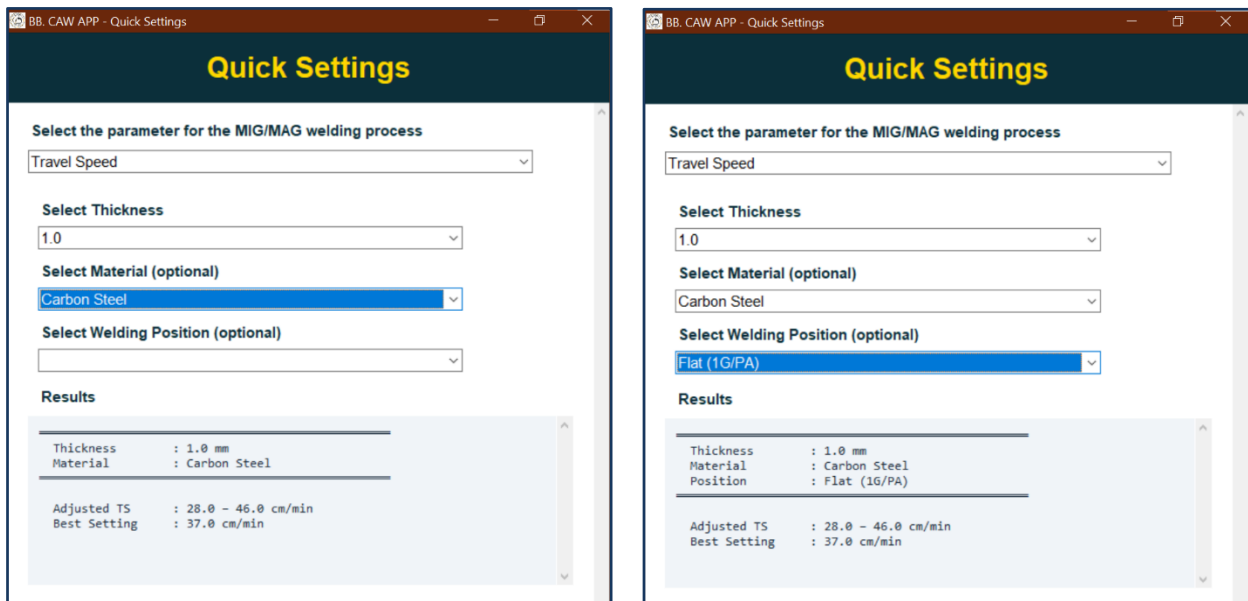


Figure III. 99. Influence du matériau et de la position de soudage sur la vitesse de soudage

III.6.2.8. Polarité

- Sélectionnez **Polarity** dans la liste.

L'écran de la figure III.98 présente l'interface de recommandation de la polarité de soudage.

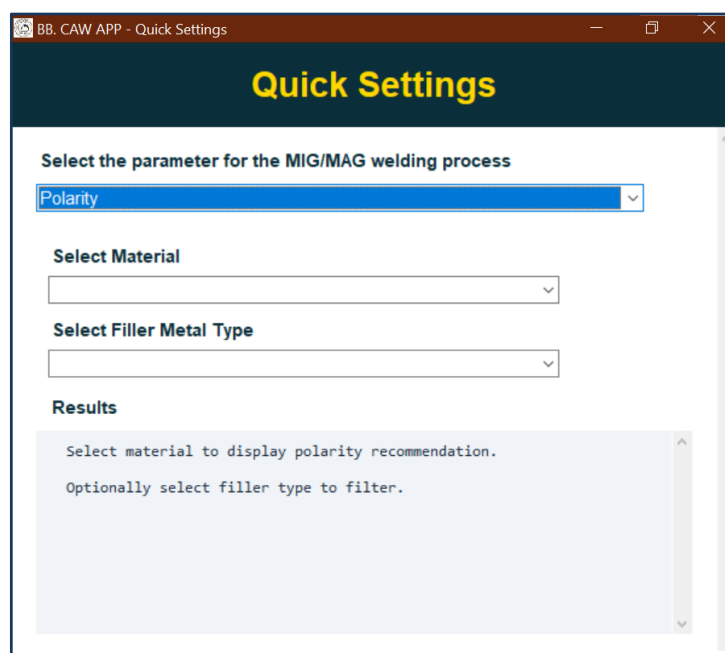
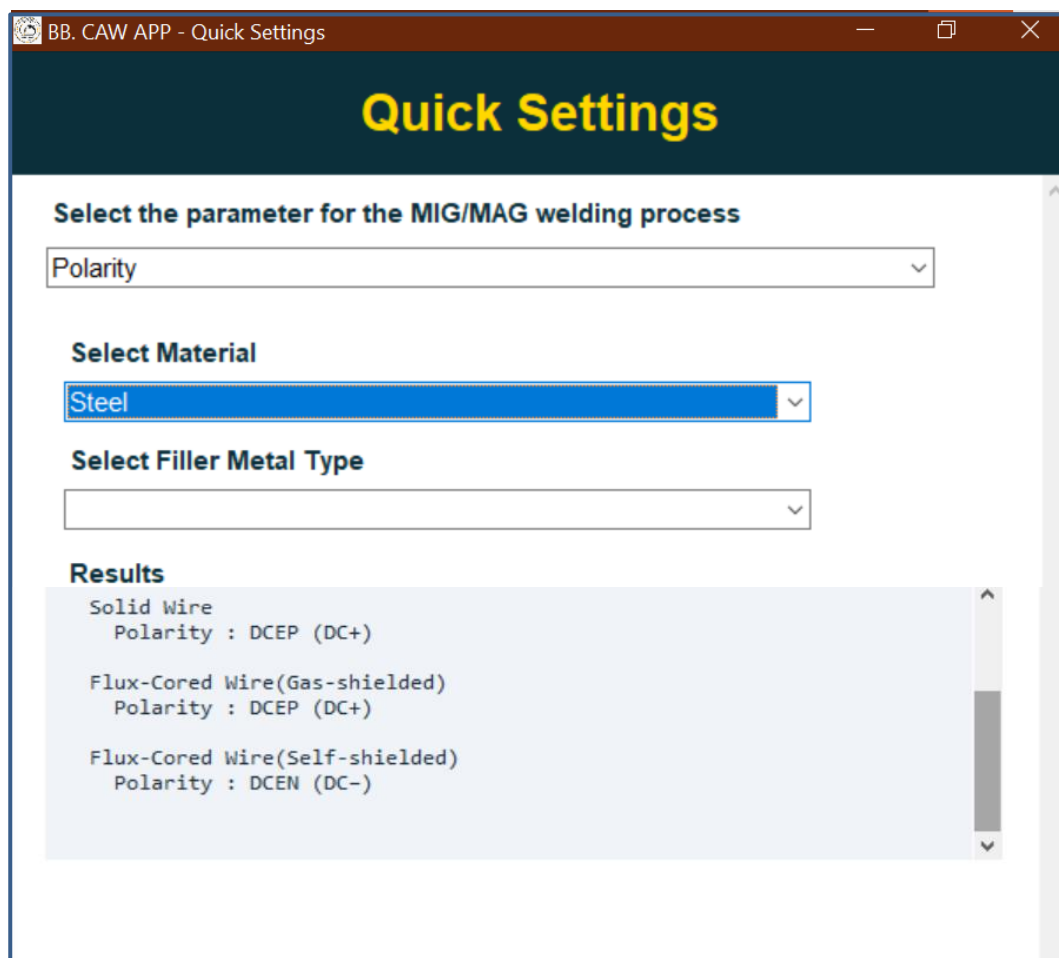


Figure III. 100. Interface de recommandation de la polarité de soudage

- Sélectionnez le matériau afin d'afficher les recommandations de polarité.

L'écran de la figure III.99 présente les résultats de la polarité recommandée selon le type de métal d'apport.



The screenshot shows a software window titled "BB. CAW APP - Quick Settings". The main heading is "Quick Settings" in yellow text on a dark blue background. Below this, there are three dropdown menus for configuration:

- Select the parameter for the MIG/MAG welding process:** The dropdown is set to "Polarity".
- Select Material:** The dropdown is set to "Steel".
- Select Filler Metal Type:** The dropdown is currently empty.

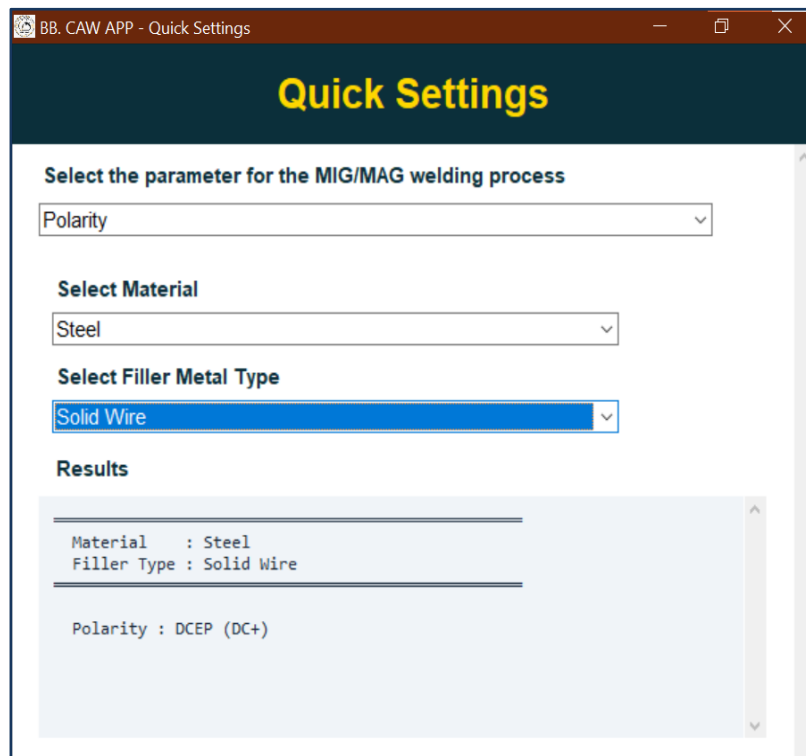
Below the configuration section, there is a "Results" section with a light blue background. It lists three wire types with their recommended polarities:

Wire Type	Recommended Polarity
Solid Wire	DCEP (DC+)
Flux-Cored Wire(Gas-shielded)	DCEP (DC+)
Flux-Cored Wire(Self-shielded)	DCEN (DC-)

Figure III. 101. Résultats de la polarité recommandée selon le type de métal d'apport

- Choisir le type de métal d'apport pour filtrer les résultats.

La figure III.100 présente l'interface de calcul du résultat de la polarité.



BB. CAW APP - Quick Settings

Quick Settings

Select the parameter for the MIG/MAG welding process

Polarity

Select Material

Steel

Select Filler Metal Type

Solid Wire

Results

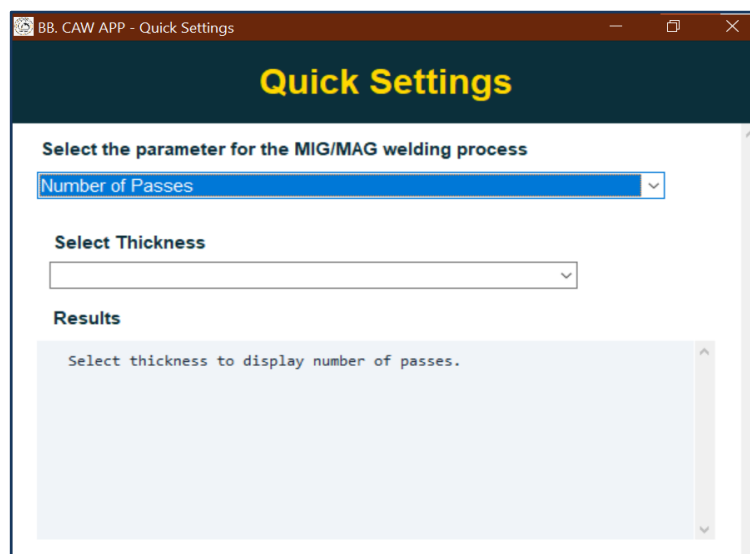
Material : Steel
Filler Type : Solid Wire
Polarity : DCEP (DC+)

Figure III. 102. Interface de calcul du résultat de la polarité

III.6.2.9. Nombre de passes

- Sélectionnez **Number of Passes** dans la liste.

L'écran de la figure III.101 présente l'interface de calcul du nombre de passes de soudage.



BB. CAW APP - Quick Settings

Quick Settings

Select the parameter for the MIG/MAG welding process

Number of Passes

Select Thickness

Results

Select thickness to display number of passes.

Figure III. 103. Interface de calcul du nombre de passes de soudage

- Sélectionnez l'épaisseur afin d'afficher le nombre de passes.

L'écran de la figure III.102 présente le résultat du nombre de passes recommandé.

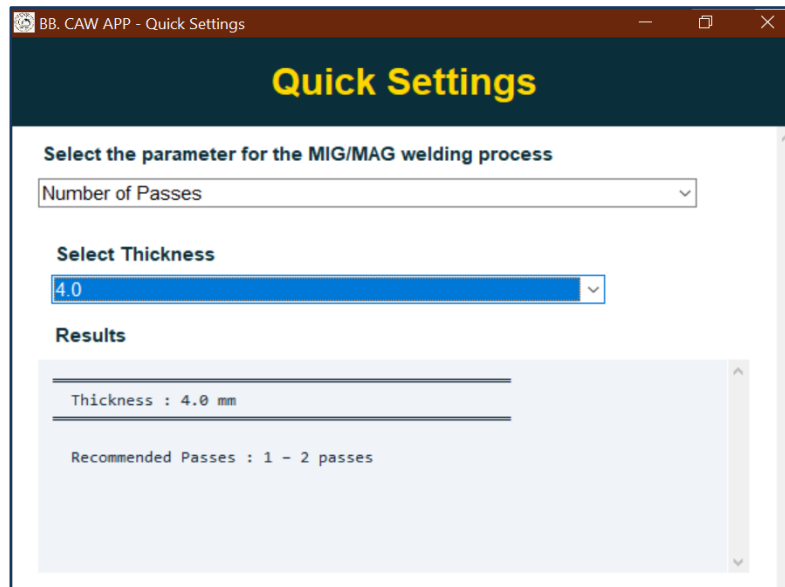


Figure III. 104. Résultat du nombre de passes recommandé

III.6.2.10. Distance de la pointe de contact à la pièce

- Sélectionnez **CTWD (Contact Tip to Work Distance)** dans la liste.

L'écran de la figure III.103 présente l'interface de calcul de la distance bec-pièce.

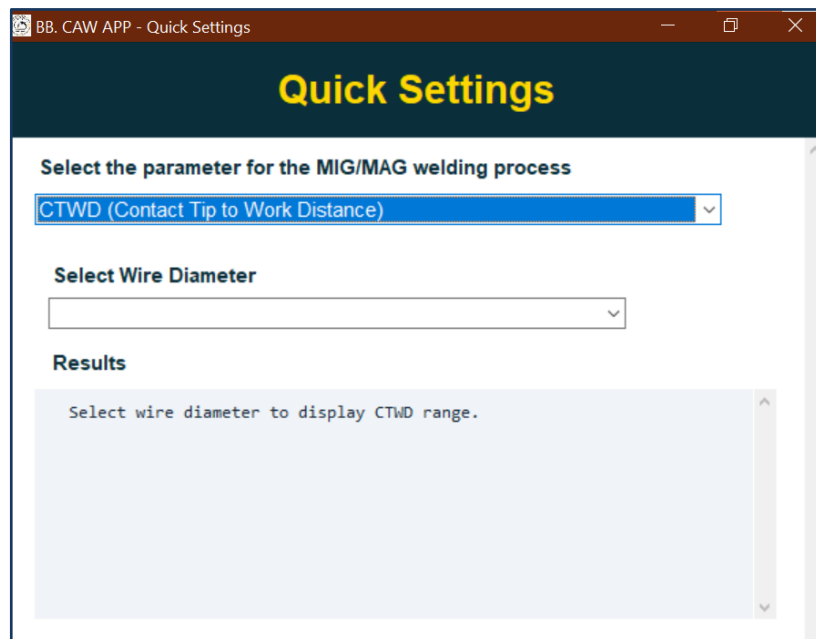


Figure III. 105. Interface de calcul de la distance bec-pièce

- Sélectionnez le diamètre du fil afin d'afficher la plage de CTWD.

L'écran de la figure III.104 présente les résultats de la distance bec-pièce.

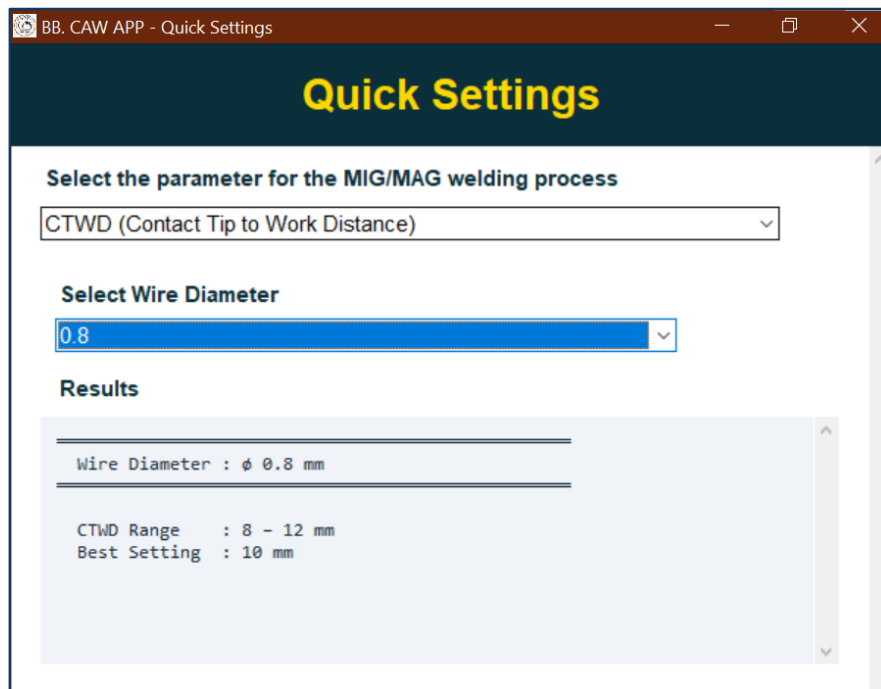


Figure III. 106. Résultats de la distance bec-pièce

III.6.2.11. Température de préchauffage

- Sélectionnez **Preheat Temperature** dans la liste.

L'écran de la figure III.105 présente l'interface de calcul de la température de préchauffage.

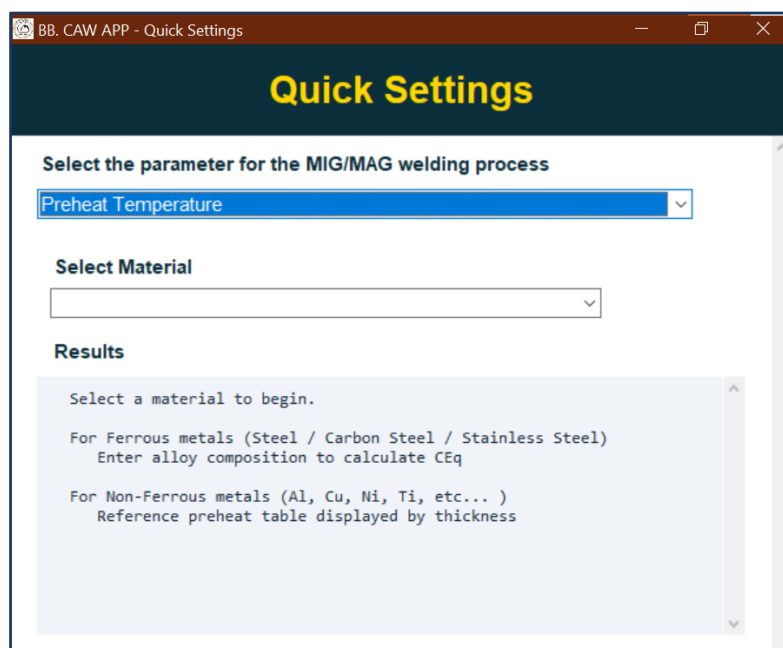


Figure III. 107. Interface de calcul de la température de préchauffage

- Pour les métaux ferreux (acier / acier au carbone / acier inoxydable) : saisissez la composition de l'alliage afin de calculer le coefficient équivalent de dilatation thermique (Ceq).

L'écran de la figure III.106 présente le formulaire de calcul de la température de préchauffage.

Figure III. 108. Formulaire de calcul de la température de préchauffage par (Ceq)

- Pour les métaux non ferreux (Al, Cu, Ni, Ti, etc.), un tableau de préchauffage de référence est affiché en fonction de l'épaisseur.

L'écran de la figure III.107 présente le tableau de préchauffage pour les métaux non ferreux.

Thickness Range	Preheat Temperature
0 - 6 mm	Not required
6 - 12 mm	Not required
12 - 19 mm	Not required
19 - 25 mm	65°C
25 - 50 mm	65°C
> 50 mm	90-120°C

Figure III. 109. Tableau de préchauffage pour les métaux non ferreux

Exemple : métaux non ferreux (Nickel) et acier avec calcul Ceq

L'écran de la figure III.108 présente les résultats de préchauffage.

BB.CAW APP - Quick Settings

Quick Settings

Select the parameter for the MIG/MAG welding process:
Preheat Temperature

Select Material:
Aluminum

Select Thickness:
1.5

Results

Material : Aluminum
Thickness : 1.5 mm
Preheat Temp : Not required

PREHEAT TABLE :

Thickness Range	Preheat Temperature
0 - 6 mm	Not required

CAW APP - Quick Settings

Quick Settings

Select the parameter for the MIG/MAG welding process:
Preheat Temperature

Select Material:
Steel

CEq = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15

C (Carbon) : 0.36
Mn (Manganese) : 0.77
Cr (Chromium) : 0.96
Mo (Molybdenum) : 0.28
V (Vanadium) : 0.00
Ni (Nickel) : 0.16
Cu (Copper) : 0.00
Thickness : 10

CALCULATE PREHEAT

Results :

Material : Steel
Thickness : 10.0 mm

C = 0.36
Mn / 6 = 0.77 / 6 = 0.1283
(Cr+Mo+V) / 5 = (0.96+0.28+0.0) / 5 = 0.248
(Ni+Cu) / 15 = (0.16+0.0) / 15 = 0.0107

PREHEAT ASSESSMENT:

Risk Level : VERY HIGH RISK
Preheat Needed : YES
Preheat Temp : 2 250°C

Figure III. 110. Résultats de préchauffage

III.7. Explication du cadre des commandes rapides

III.7.1. Fichiers machine

L'écran de la figure III.109 présente la fenêtre des fiches techniques des machines en cliquant

Sur

Machine files

BB.CAW APP - Machine files

MACHINE FILES

MAX 405	Artsen PM 500 F
MP250	Empty
Lincoln Power MIG 256	Empty
Miller Multimatic 215	Empty
Telwin Maxima 200 Synergic	Empty
PROMIG-200SYN Pulse	Empty
YesWelder MIG-205DS	Empty
IPOTOOLS MIG-185	Empty

Figure III. 111. Fenêtre des fiches techniques des machines

L'écran de la figure III.110 présente la fiche technique PDF d'une machine de soudage en cliquant sur **MAX 405**.



Figure III. 112. Fiche technique PDF d'une machine de soudage (MAXI 405-505)

III.7.2. Informations du document

L'écran de la figure III.111 présente la fenêtre d'information du document en cliquant

Sur **Document Information**.

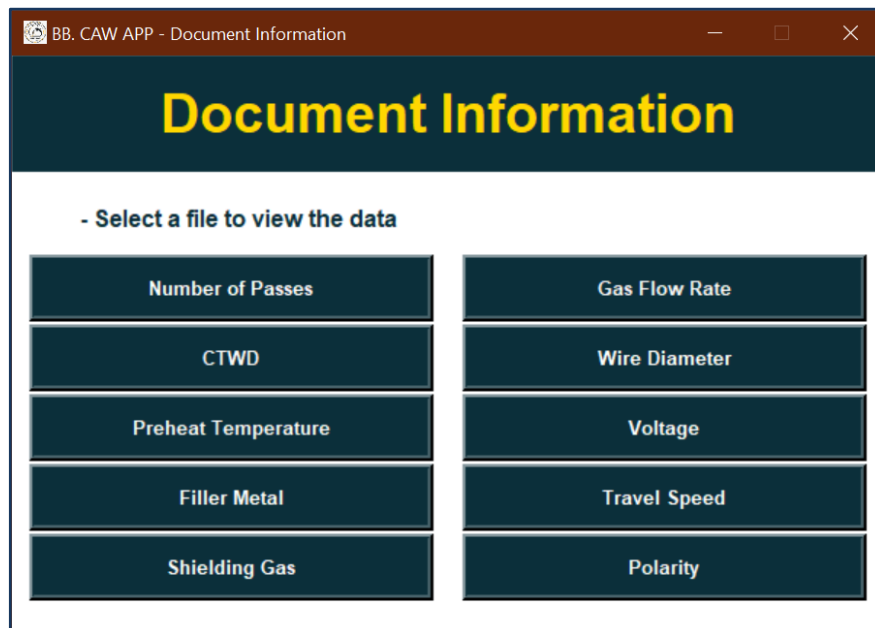
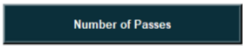
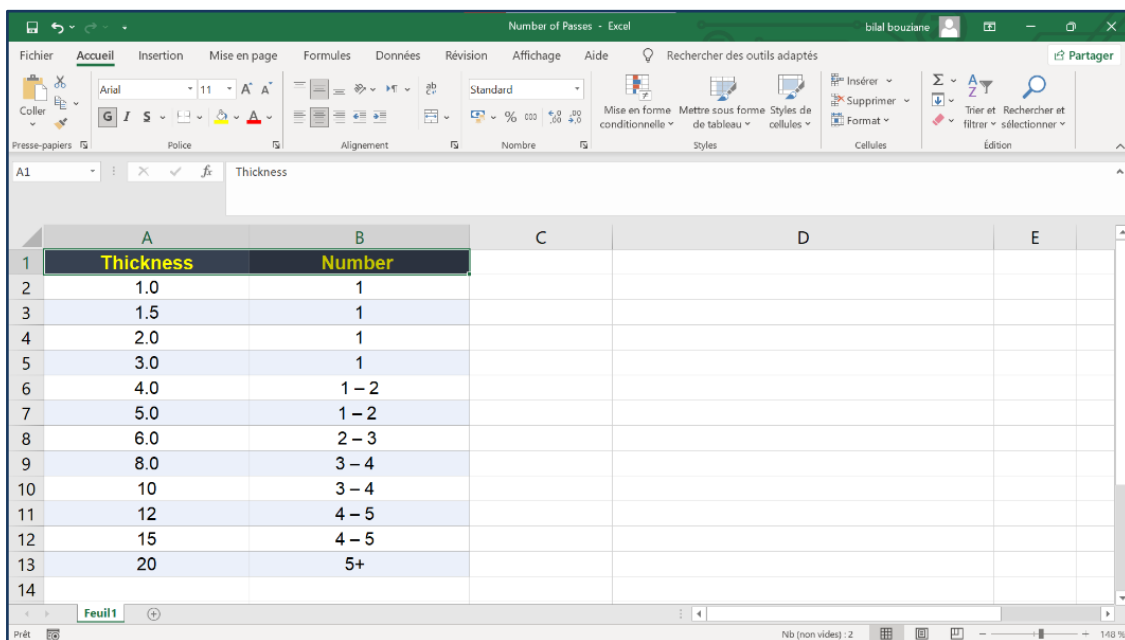


Figure III. 113. Fenêtre Document Information

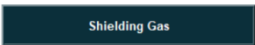
Exemple :

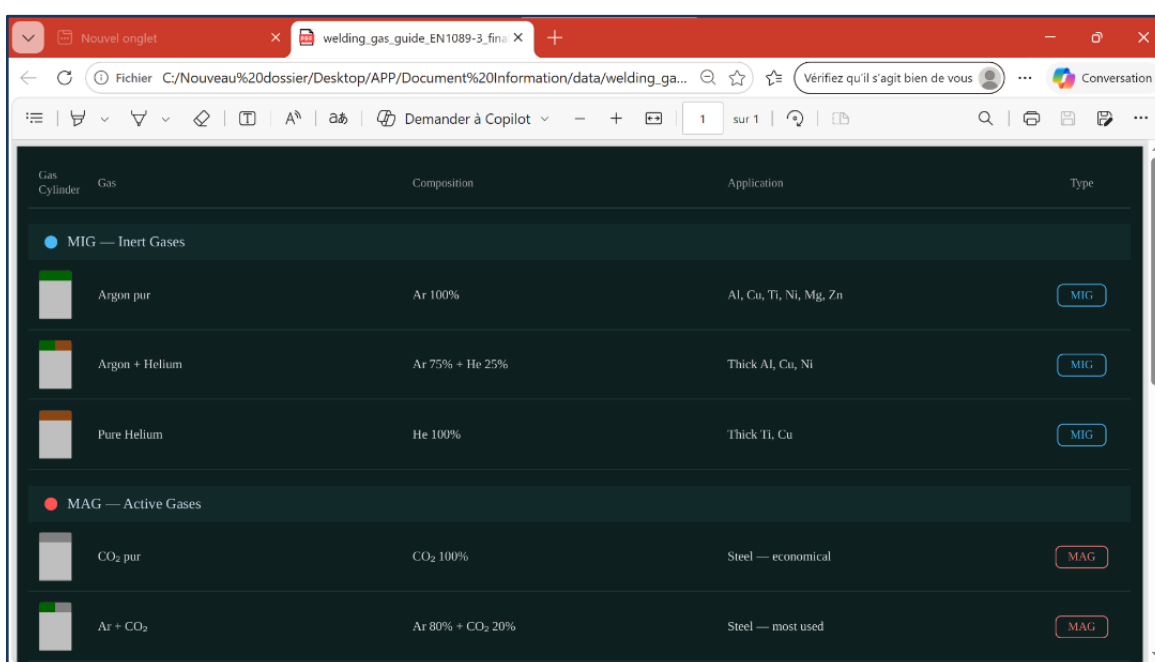
L'écran de la figure III.112 présente le tableau du nombre de passes de soudage selon l'épaisseur en cliquant sur  .



	A	B	C	D	E
	Thickness	Number			
1					
2	1.0	1			
3	1.5	1			
4	2.0	1			
5	3.0	1			
6	4.0	1 - 2			
7	5.0	1 - 2			
8	6.0	2 - 3			
9	8.0	3 - 4			
10	10	3 - 4			
11	12	4 - 5			
12	15	4 - 5			
13	20	5+			
14					

Figure III. 114. Nombre de passes de soudage selon l'épaisseur

La figure III.113 présente le guide des gaz de soudage MIG/MAG : composition et applications en cliquant sur  .



Gas Cylinder	Gas	Composition	Application	Type
MIG — Inert Gases				
	Argon pur	Ar 100%	Al, Cu, Ti, Ni, Mg, Zn	MIG
	Argon + Helium	Ar 75% + He 25%	Thick Al, Cu, Ni	MIG
	Pure Helium	He 100%	Thick Ti, Cu	MIG
MAG — Active Gases				
	CO ₂ pur	CO ₂ 100%	Steel — economical	MAG
	Ar + CO ₂	Ar 80% + CO ₂ 20%	Steel — most used	MAG

Figure III. 115. Guide des gaz de soudage MIG/MAG

III.7.3. Enregistrement du rapport de soudage

- Cliquez sur le bouton  à partir du cadre des commandes rapides, le rapport est enregistré dans un fichier.

L'écran de la figure III.114 présente la sauvegarde du rapport de soudage.

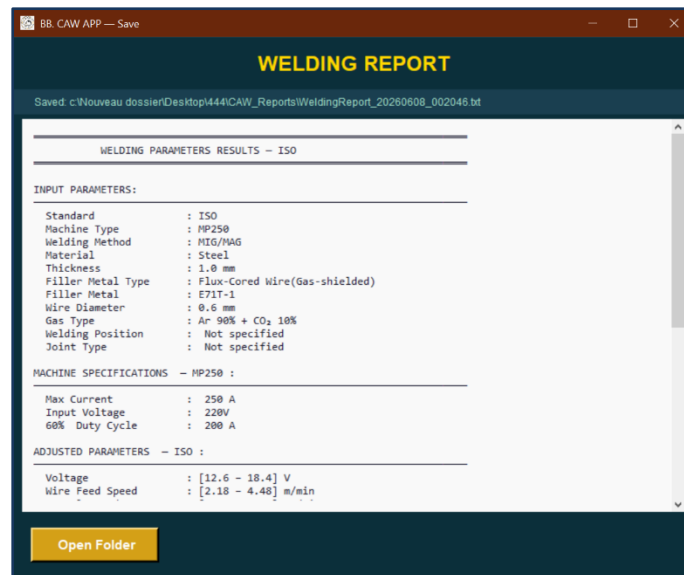


Figure III. 116. Sauvegarde du rapport de soudage

- Cliquez sur le bouton  cela ouvre le dossier dans lequel les fichiers sont enregistrés.

L'écran de la figure III.115 présente le dossier de sauvegarde des rapports de soudage.

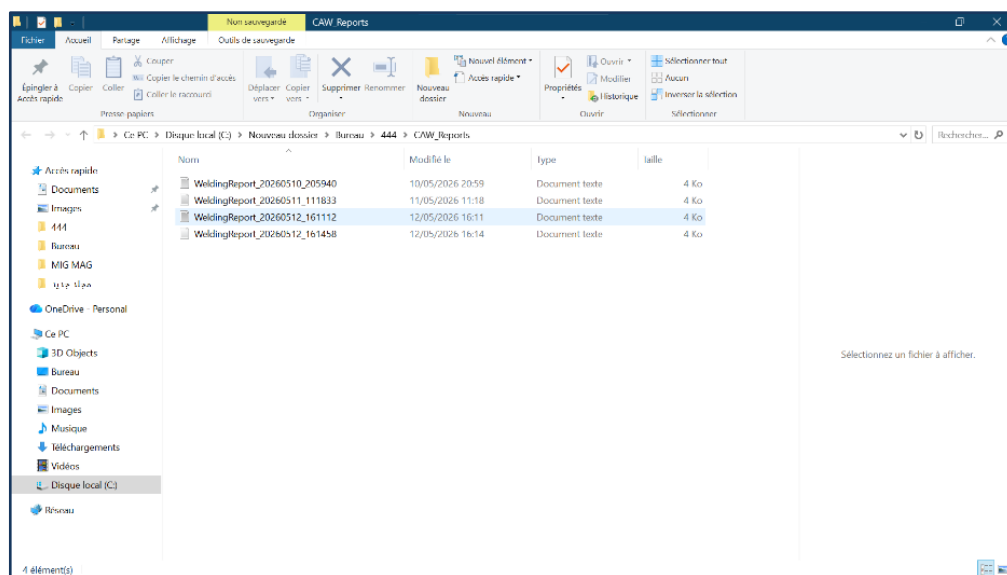


Figure III. 117. Dossier de sauvegarde des rapports de soudage

L'écran de la figure III.116 présente un message d'avertissement (aucun rapport à sauvegarder) en cliquant sur le bouton .

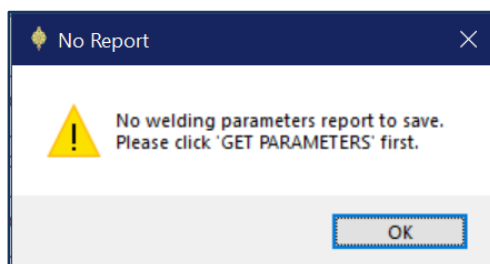


Figure III. 118. Message d'avertissement aucun rapport à sauvegarder

III.7.4. Fermeture de l'application

- Cliquez sur le bouton  pour la fermeture de l'application.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

En conclusion, le soudage MIG/MAG est l'une des techniques de soudage les plus utilisées dans le domaine industriel moderne, grâce à sa rapidité d'exécution, sa facilité de mise en œuvre et la bonne qualité des assemblages obtenus.

Ce procédé est largement employé dans différents secteurs tels que la construction métallique, l'industrie automobile et les structures industrielles, en raison de sa capacité à assurer une productivité élevée avec une précision satisfaisante.

Le but de ce projet de fin d'étude est le développement d'un module d'aide au réglage des paramètres de soudage des postes MIG/MAG dans un environnement de soudage assisté par ordinateur (Computer Aided Welding).

Cette interface remplit plusieurs fonctions essentielles :

- Choix du fil d'apport en fonction des matériaux à souder ;
- Choix du gaz de protection ;
- Choix du débit de gaz en fonction de l'épaisseur de la pièce ;
- Calcul de la tension de soudage en fonction des matériaux à souder, du gaz de protection utilisé et de l'épaisseur de la pièce ;
- Choix du diamètre du fil en fonction de l'épaisseur de la pièce ;
- Choix de la vitesse de soudage en fonction de l'épaisseur de la pièce, du matériau et de la position de soudage ;
- Choix de la polarité en fonction du matériau ;
- Choix du nombre de passes en fonction de l'épaisseur de la pièce ;
- Calcul de la température de préchauffage en fonction du matériau et l'épaisseur de la pièce ;
- Fiches techniques des postes de soudage MIG/MAG ;

En perspective, ce travail peut être enrichi par le développement d'une base de données plus complète sur les paramètres du MIG/MAG, ainsi que par l'ajout de vidéos explicatives et développement d'une interface web ou mobile.

WEBOGRAPHIE

- [1] : Techniques de l'Ingénieur — Soudage MAG dans l'industrie automobile, paramètres clés. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210/soudage-mag-dans-l-industrie-automobile-bm7731/soudage-mag-parametres-cles-bm7731niv10002.html>
- [5] : Lasertubi — Procédé de soudage MAG. <https://www.lasertubi.it/fr/procede-de-soudage-mag/>
- [6] : Rocd@cier — Cours de soudage MIG/MAG. <https://www.rocdacier.com/cours-de-soudage/>
- [8] : Air Liquide — Le procédé de soudage MIG/MAG (GMAW). <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/le-procede-de-soudage-mig-mag-gmaw>
- [9] : [Réglage De La Vitesse Du Fil En Soudure MIG-MAG : Le Guide Pratique » Lecteurs](#)
- [10] : Lecteurs.ca — Réglage de la vitesse du fil en soudure MIG-MAG : le guide pratique. <https://www.lecteurs.ca/reglage-de-la-vitesse-du-fil-en-soudure-mig-mag-le-guide-pratique/>
- [Réglage De La Vitesse Du Fil En Soudure MIG-MAG : Le Guide Pratique » Lecteurs](#)
- [11] : Telwin — L'art du soudage MIG/MAG : courant continu et polarités. <https://www.telwin.com/intl/fr/academy/art-soudage/MIG>
- [12] : Telwin — L'art du soudage MIG/MAG : polarité directe DCEP. <https://www.telwin.com/intl/fr/academy/art-soudage/MIG>
- [13] : Telwin — L'art du soudage MIG/MAG : polarité directe DCEN et fil fourré. <https://www.telwin.com/intl/fr/academy/art-soudage/MIG>
- [15] : Telwin — L'art du soudage MIG/MAG : courant pulsé. <https://www.telwin.com/intl/fr/academy/art-soudage/MIG>
- [19] : Soudeurs.com — Quelle est la méthodologie de recherche des paramètres de soudage du procédé MIG/MAG ? <https://www.soudeurs.com/site/quelle-est-la-methodologie-de-recherche-des-parametres-de-soudage-du-procede-mig-mag-363/>
- [21] : YesWelder, MIG Welding Settings Chart
[MIG Welding Settings Chart: Voltage, Wire Speed & Gas Guide - YesWelder](#)

- [22] : Steelsoudeur.com — Soudage MIG/MAG : vitesse de soudage et qualité du cordon.
<https://www.steelsoudeur.com/techniques/soudage-mig-mag.php>
- [24] : TWI. What is Gas Metal Arc Welding (GMAW / MIG-MAG welding)? Available at:
<https://www.twi-global.com>
- [25] : Soudeurs.com — Tableau aide-mémoire des paramètres de soudage.
<https://www.soudeurs.com/les-novices-les-neophytes-et-les-bricoleurs-soudeurs/3609-tableau-aide-memoire.html>
- [27] : Soudeurs.com — Recherche paramètre général de soudage MIG/MAG (vitesse de dévidage). <https://www.soudeurs.com/procede-de-soudage-mig-mag-114-131-135-136-138-forum/6460-cherche-parametre-general-de-soudage-mig-mag.html>
- [28] : Vector Welding — Réglage poste à souder MIG/MAG expliqué facilement.
<https://vector-welding.fr/reglage-poste-a-souder-mig/>
- [29] : [Soudage MIG/MAG : guide complet \(principe, réglages, gaz, défauts\)](#)
- [30] : Wikipédia — Soudage MIG-MAG : diamètre du fil électrode.
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage MIG-MAG](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_MIG-MAG)
- [32] : EWM GmbH — Influence du CTWD sur les paramètres de soudage MIG/MAG.
<https://www.ewm-group.com/fr/connaissances-techniques/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>
- [34] : EWI (Edison Welding Institute) — Gas Metal Arc Welding Basics: CTWD.
<https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-travel-speed-and-contact-to-work-distance-ctwd/>
- [35] : Soudeurs.com — Influence de l'angle de la torche sur le soudage MIG/MAG.
<https://www.soudeurs.com/site/quelle-est-la-methodologie-de-recherche-des-parametres-de-soudage-du-procede-mig-mag-363/>
- [52] : Air Liquide — Facteur de marche en soudage : cycle de soudage et temps de repos.
<https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/facteur-de-marche-en-soudage>
- [53] : Soudeurs.com — Comprendre le schéma du cycle de soudage sur un générateur TIG/GTAW : phase pré-gaz. <https://www.soudeurs.com/site/comprendre-le-schema-du-cycle-de-soudage-sur-un-generateur-tig-gtaw-371/>
- [54] : Promeca — Procédés de soudage MIG/MAG : amorçage de l'arc.
<https://www.promeca.com/contenu/21-procedes-de-soudage>

- [55] : EasyWeld France — Procédé MIG/MAG : guide du soudeur (phase de soudage).
<https://www.easyweldfrance.com/procede-mig-mag-guide-du-soudeur/>
- [56] : EWM GmbH — Extinction de l'arc et remplissage du cratère en fin de cordon.
<https://www.ewm-group.com/fr/connaissances-techniques/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>
- [57] : EWM GmbH — Post-gaz et protection du cordon après extinction de l'arc.
<https://www.ewm-group.com/fr/connaissances-techniques/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>
- [58] : EWM GmbH — Post-gaz : durée d'écoulement du gaz de protection après soudage.
<https://www.ewm-group.com/fr/connaissances-techniques/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>
- [59] : Air Liquide — Facteur de marche en soudage (norme NF EN 60974-1).
<https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/facteur-de-marche-en-soudage>
- [60] : Promeca — Facteur de marche et tension à vide du poste à souder.
<https://www.promeca.com/contenu/25-facteur-de-marche-et-tension-a-vide-poste-a-souder>
- [61] : Air Liquide — Facteur de marche en soudage manuel et automatisé.
<https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/facteur-de-marche-en-soudage>
- [64] : <https://www.promeca.com/contenu/21-procedes-de-soudage>
- [65] : [Rocd@cier](#)
- [66] : [Wikipedia](#)
- [69] : [Soudeurs.com](#)
- [71] : <https://www.leboncoin.fr/ad/bricolage/3136597601>.
- [73] : Rocd@cier – Torches MIG/MAG et buses de soudage (guide technique)
<https://www.rocdacier.com/torches-mig-mag/>
- [74] : BICOR BINZEL. Gas nozzles for MIG/MAG welding torches – Wear parts selection guide. <https://www.binzel-abicor.com>
- [75] : ESAB. Gas Metal Arc Welding (GMAW/MIG-MAG) Process Guidelines.
<https://www.esab.com>

- [76] : ArcCaptain. MIG Welding Gas Flow Rate Setting Chart,
<https://www.arccaptain.com/blogs/article/mig-welding-gas-flow-rate>
- [77] : [Bienvenue sur le site d'ABICOR BINZEL France ...](#)
- [79] : Messer — Choix du gaz de soudage : métal d'apport et compatibilité.
<https://www.messer.fr/choix-gaz-soudage>
- [80] : ESAB — MIG/MAG Welding Guide : fils pleins massifs.
<https://www.esab.com/en/us/education/blog/mig-mag-welding-guide>
- [81] : Lincoln Electric — Flux-Cored Welding Guide : fils fourrés rutile et basique.
<https://www.lincolnelectric.com/en/support/welding-how-to/flux-cored-welding>
- [82] : Miller Electric — Self-Shielded Flux-Cored Welding : fils fourrés auto-protégés.
<https://www.millerwelds.com/resources/article-library/self-shielded-flux-cored-welding>
- [83] : Fronius — Aluminium MIG Welding : fils aluminium et gaine téflon.
<https://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/aluminium-welding>
- [84] : Sandvik — Stainless Steel Welding Wire : fils inoxydables et nuances.
<https://www.materials.sandvik/en/materials-center/material-datasheets/welding-wire>
- [85] : Anhua Machining — Guide de sélection des gaz pour le soudage MIG.
<https://www.lyah-machining.com/fr/guide-de-selection-des-gaz-pour-le-soudage-mig/>
[Anhua Machining](#)
- [86] : Apprenti Soudeur — Quel gaz de soudure ? Argon pur pour le MIG.
<https://apprentisoudeur.fr/quel-gaz-soudure/>
- [87] : Soudeurs.com — Quel type de gaz de protection utiliser pour souder en MIG et MAG ?
<https://www.soudeurs.com/site/quel-type-de-gaz-de-protection-dois-je-utiliser-pour-souder-en-mig-131-et-en-mag-135-gmaw-168/>
- [89] : EWM GmbH — Protection secondaire : post-gaz et refroidissement du cordon.
<https://www.ewm-group.com/fr/connaissances-techniques/schutzgase.html>

BIBLIOGRAPHIE

- [2]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé de soudage MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [3]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé de soudage MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [4]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du soudage MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [7]** : Dan Erlandsson — Les fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [14]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé de soudage MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [16]** : Manuel du soudeur — Pour le soudage sous protection gazeuse et l'oxycoupage, Air Products and Chemicals, Inc.2019.
- [17]** : Larry Jeffus — Welding Principles and Applications, 8^e édition, Cengage Learning, 2016. Howard B. Cary & Scott C. Helzer — Modern Welding Technology, 6^e édition, Pearson Prentice Hall, 2004
- [18]** : Yousfi, Rami. Réglage du poste de soudage TIG sous la contrainte des paramètres de soudage. Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2025.
- [20]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [23]** : Wenders, G. (2021). Le soudage MIG MAG : Mémo sur : Principe – Matériaux – Soudage – Défauts. Steeltech Services SPRL.
- [26]** : Wenders, G. (2021). Le soudage MIG MAG : Mémo sur : Principe – Matériaux – Soudage – Défauts. Steeltech Services SPRL.
- [31]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [33]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [35]** : Manuel du soudeur — Pour le soudage sous protection gazeuse et l'oxycoupage, Air Products and Chemicals, Inc.2019.

- [36] : IFPM Formation. (2018). *Soudage : Électrode enrobée, MIG-MAG, TIG*. Bruxelles : IFPM Formation (Éditeur responsable : Brigitte Remacle, Bld Reyers 80, 1030-Bruxelles).
- [37] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé de soudage MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [38] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [39] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [40] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé de soudage MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [41] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [42] : IFPM Formation. (2018). *Soudage : Électrode enrobée, MIG-MAG, TIG*. Bruxelles : IFPM Formation (Éditeur responsable : Brigitte Remacle, Bld Reyers 80, 1030-Bruxelles).
- [43] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé de soudage MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [44] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [45] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [46] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé de soudage MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [47] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [48] : IFPM Formation. (2018). *Soudage : Électrode enrobée, MIG-MAG, TIG*. Bruxelles : IFPM Formation (Éditeur responsable : Brigitte Remacle, Bld Reyers 80, 1030-Bruxelles).
- [49] : IFPM Formation. (2018). *Soudage : Électrode enrobée, MIG-MAG, TIG*. Bruxelles : IFPM Formation (Éditeur responsable : Brigitte Remacle, Bld Reyers 80, 1030-Bruxelles).
- [50] : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.

- [51]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [62]** : IFPM Formation. (2018). *Soudage : Électrode enrobée, MIG-MAG, TIG*. Bruxelles : IFPM Formation (Éditeur responsable : Brigitte Remacle, Bld Reyers 80, 1030-Bruxelles).
- [63]** : IFPM Formation. (2018). *Soudage : Électrode enrobée, MIG-MAG, TIG*. Bruxelles : IFPM Formation (Éditeur responsable : Brigitte Remacle, Bld Reyers 80, 1030-Bruxelles).
- [67]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [68]** : IFPM Formation. (2018). *Soudage : Électrode enrobée, MIG-MAG, TIG*. Bruxelles : IFPM Formation (Éditeur responsable : Brigitte Remacle, Bld Reyers 80, 1030-Bruxelles).
- [70]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [72]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [78]** : LINCOLN ELECTRIC — The Procedure Handbook of Arc Welding, 14^e éd. The Lincoln Electric Company, 2000, p. 5.1–5.8.
- [88]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [90]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.
- [91]** : SD Service. (2016). Le soudage MIG-MAG. Support pédagogique de formation aux procédés de soudage MIG/MAG.
- [92]** : Dan Erlandsson — Principes fondamentaux du procédé MIG/MAG, ESAB AB Welding Equipment, Laxå, Suède, 2007.