

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblages soudés et Matériaux

Par : SALEM ATTIA Mohammed

Sujet

Application d'analyse automatique des défauts de soudage.

Automatic Welding Defect. Analysis Program.

Soutenu publiquement, le 21/06/2026 , devant le jury composé de :

M. GUEZZEN Samir	MCB	Université de Tlemcen	Président
M. BRAIRI Samir	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M. HADJOUI Féthi	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant
M. HADJOUI Abdelhamid	Pr	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciement

Loué soit Dieu, par la grâce duquel toute bonne chose est accomplie, et par la faveur et la guidance duquel nous avons atteint l'honneur du savoir et mené à bien ce parcours universitaire.

J'exprime ma plus profonde gratitude et ma reconnaissance à ma chère famille ; à mon père bien-aimé, qui a été mon soutien et ma force, et à ma chère mère, dont les prières ont levé mes difficultés. Je vous dédie ce travail.

J'exprime également mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mes deux Encadrants HADJON Féthi et HADJON Abdelhamid, qui m'ont généreusement offert leurs précieux conseils et leur patience, et dont leurs observations pertinentes ont été essentielles à la réussite de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à mes deux enseignants, monsieur MEZZEN Samir en tant que président de jury et monsieur BRAIR Samir en tant qu'examineur.

Enfin, mes remerciements les plus sincères vont à tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, et à mes collègues qui ont partagé avec moi le chemin des études, avec tous ses défis et ses difficultés.

Dédicace

À chaque fois qu'on achève une étape importante dans notre vie, on fait une pose pour regarder en arrière et se rappeler toutes ces personnes qui ont partagé avec nous tous les bons moments de notre existence, mais surtout les mauvais.

Ces personnes qui nous ont aidés sans le leur dire, soutenus sans réserve, aimé sans compter, ces personnes à qui notre bonheur devient directement le leur, à qui un malheur en nous, en eux se transforme en pleur.

À mes très chers parents, ce travail représente l'aboutissement du leur soutien qu'ils prodigués tout au long de ma scolarité, mes remerciements ne pourront jamais égaler leur amour, encouragements et sacrifices À toute ma famille de près ou de loin. À toutes ces âmes je dédie ce travail en signe de reconnaissance et de respect.

المخلص

يُقدّم هذا العمل تطوير تطبيق برمجي مبتكر مُخصّص للتشخيص الآلي لعيوب اللحام. يعتمد التطبيق على منهج معدني، حيث يدمج الخوارزمية معايير هندسية وكهربائية وبيئية (كالرطوبة والرياح) لتقييم مدخلات الحرارة ومعدل التخفيف. يُحسّن البرنامج الحساب الحراري لزمن التبريد $\Delta_{f_{8/5}}$ للتنبؤ بمخاطر التشققات والمسامية. وأخيراً، بفضل واجهة سهلة الاستخدام، تُزوّد هذه الأداة المهندسين بتشخيصات دقيقة وتُوصي بحلول تصحيحية مثالية لضمان جودة اللحامات.

الكلمات المفتاحية: عيوب اللحام، التشقق، جودة الوصلات، التشخيص، الأتمتة.

Abstract

This work presents the development of an innovative software application dedicated to the automatic diagnosis of welding defects. Based on a metallurgical approach, the algorithm integrates geometric, electrical, and environmental parameters (humidity, wind) to evaluate heat input and dilution rate. The program refines the thermal calculation of the cooling time ($\Delta_{f_{8/5}}$) to predict the risks of cracking and porosity. Finally, thanks to an intuitive interface, this tool provides engineers with targeted diagnostics and recommends optimal corrective solutions to guarantee the quality of the welds.

Keywords: Welding defects, cracking, joint quality, diagnostics, automation.

Résumé

Ce travail présente le développement d'une application logicielle innovante dédiée au diagnostic automatique des défauts de soudage. En se basant sur une approche métallurgique, l'algorithme intègre des paramètres géométriques, électriques et environnementaux (humidité, vent) pour évaluer l'apport calorifique et le taux de dilution. Le programme permet d'affiner le calcul thermique du temps de refroidissement $\Delta_{f_{8/5}}$ afin de prédire les risques de fissuration et de porosités. Enfin, grâce à une interface intuitive, cet outil offre aux ingénieurs un diagnostic ciblé et préconise des solutions correctives optimales pour garantir la qualité des assemblages.

Mots clés : Défauts de soudage, fissuration, qualité des assemblages, diagnostic, automatisation.

Sommaire

Remerciement.....	2
Dédicace.....	3
Liste des figures.....	8
Introduction Générale.....	9
Chapitre I : Étude des Procédés de Soudage à l'Arc (TIG et MIG/MAG).....	11
I.1. Principes et Mécanismes de Fusion (MIG /MAG et TIG).....	12
I.1.1 Étude Thermo physique et Dynamique du Soudage MIG/MAG : Analyse des Mécanismes de Fusion	12
I.1.2 Modélisation de la Colonne d'Arc (Plasma)	12
I.1.3 Dynamique du Bain de Fusion : L'Effet Marangoni	13
I.1.4 Comportement Métallurgique et Gaz de Protection	13
I.1.5 Synthèse Technique pour l'Ingénierie	13
I.2. Domaines d'Application et Paramètres de Contrôle Opérateur (MIG /MAG et TIG) .	14
I.2.1. Critères de sélection et domaines d'application	14
I.2.2. Les leviers de contrôle opératoire	14
I.2.3. Tableau Récapitulatif : Comparaison Technique et Opérateur (MIG/MAG vs TIG)	15
Chapitre II : Analyse des Paramètres Influençant la Morphologie du Cordon de Soudure.....	17
II.1. Les Paramètres Électriques	18
II.1.1. Intensité du courant (I) et vitesse de dévidage	18
II.1.2. Tension de l'arc (U) et longueur d'arc	18
II.1.3. Influence de la polarité (DC+ / DC-)	19
II.1.4. Rôle de l'inductance (Réglage de la dynamique de l'arc)	19
II.2.1. Vitesse d'avance (V_a) : Équilibre entre productivité et intégrité	20
II.2.4. Position de soudage : La lutte contre la force gravitationnelle	21
II.3. Les Paramètres Physiques et Chimiques.....	21
II.3.1. Nature et composition du gaz de protection (Effet sur l'énergie ionisante)	22
II.3.3. Diamètre et nature du fil-électrode (Densité de courant)	22
II.4. Facteurs Environnementaux.....	23
II.4.1. Humidité relative : Cinétique de l'hydrogène et pathologie des porosités	23
II.4.3. Température ambiante et préchauffage : Maîtrise des cycles thermiques	24
II.5. Aspects Métallurgiques.....	26
II.5.1. Dilution entre métal d'apport et métal de base	26
II.5.2. Vitesse de refroidissement $\Delta f_{8/5}$, et structure des grains	26

II.5.3. Formation de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT).....	27
II.5.4. Le Carbone Équivalent (C_{eq}) : Indice de soudabilité	27
II.6. Configuration de l'Assemblage	28
II.6.1. Types de joints et préparations (Chanfreinage)	28
II.6.2. Le Jeu à la racine (Root Gap).....	28
II.6.3. Positionnement et Bridage (Contraintes de déformation)	28
II.7. Caractéristiques Mécaniques du Joint Soudé.....	29
II.7.1. Résistance à la Traction (R_m)	29
II.7.2. Ductilité et Allongement ($A\%$).....	29
II.7.3. Résilience (Essai Charpy - KCV).....	29
II.7.4. Dureté (Vickers - HV)	29
II.8. Historique de la Pièce	30
II.8.1. Traçabilité du matériau (Certificats matière)	30
II.8.2. État de service et fatigue thermique	30
II.8.3. Préparation des surfaces dégradées.....	30
Chapitre III : Conception et Développement de l'Application Informatique.....	32
III.1. Introduction au Projet : Vers une Numérisation de l'Expertise en Soudage.....	33
III.1.1. Problématique et Justification.....	33
III.1.2. Objectifs détaillés de l'application	33
III. 2. Explication du Fonctionnement du Programme	34
III.2.1. Description de l'Interface d'Accueil.....	34
III.2.2. Description de l'Interface de Saisie des Données (Input Interface).....	35
III.2.2.1. Entrées de Base :	37
III.2.2.2. Facteurs Externes :	38
III.2.2.3. Environnement	39
III.2.2.4. Analyse Métallurgique et Calcul du Carbone Équivalent.....	40
III.2.2.5. Caractéristiques Mécaniques (Dureté du Matériau).....	42
III.2.2.6. Électrode et Fil (Consommables)	43
III.2.2.7. Localisation du Défaut.....	44
III.2.2.8. Historique de la Pièce	45
III.2.2.9. Conformité (Aspect Normatif).....	47
III.2.3. Description de l'Interface de Diagnostic Final.....	48
III.2.3.1 Introduction	48
III.3.3.2 Exemples d'application.....	49
CONCLUSION GÉNÉRALE	55
Webographie et Bibliographie	57

Liste des figures

Fig. 01 : Schéma de transfert du métal (MIG MAG)	11
Fig. 02 : Schéma de transfert du métal (TIG).	11
Fig. 03 : Répartition des coûts de fabrication en soudage et influence relative du prix du gaz.	12
Fig. 04 : Comparaison du soudage T.I.M.E. avec le soudage MIG/MAG.	13
Fig. 05 : Schéma poste à souder MAG.	17
Fig. 06 : Les types de polarité en courant continu (CC)	18
Fig. 07 : Géométrie de l'électrode de tungstène et influence sur le cordon de soudure.	22
Fig. 08 : Abaque de l'IRSID pour la détermination du temps de refroidissement tr_{500}^{800} .	24
Fig. 09 : Représentation schématique d'un joint soudé et morphologie de la coupe transversale.	26
Fig. 10 : Interface d'accueil du logiciel "Automatic Welding Defect".	34
Fig. 11 : Architecture de navigation et segmentation des paramètres d'entrée.	35
Fig. 12 : Saisie des données géométriques de base (Type de métal et épaisseurs.).	36
Fig. 13 : Configuration des facteurs externes influençant le soudage.	37
Fig. 14 : Paramètres environnementaux et conditions de travail.	38
Fig. 15 : Analyse métallurgique et calcul de l'équivalent carbone (CE).	39
Fig. 16 : Evaluation de la soudabilité et recommandation de préchauffage.	40
Fig. 17 : Spécifications des caractéristiques mécaniques du joint soudé.	41
Fig. 18 : Interface de sélection et de paramétrage de l'électrode ou du fil d'apport.	42
Fig. 19 : Menu de sélection de la position exacte du défaut (Surface, Racine, ZAT).	43
Fig. 20 : Paramètres de maintenance : Nombre de réparations et traitements thermiques subis.	45
Fig. 21 : Vérification de la conformité aux normes.	46
Fig. 22 : Validation d'une Soudure sans Défaut.	49
Fig. 23 : Identification des Causes de Porosités.	50
Fig. 24 : Analyse Multi-factorielle du Défaut « Caniveau ».	51
Fig. 25 : Analyse Multi-factorielle du Défaut « Caniveau ».	52

Introduction Générale

Introduction Générale

Le soudage occupe une place prépondérante et indispensable dans le paysage industriel moderne, agissant comme le pilier de la construction métallique pour l'assemblage permanent d'infrastructures critiques telles que les pipelines, les navires et les composants aérospatiaux.

L'importance de ce procédé réside dans sa capacité à créer des joints robustes garantissant la continuité structurelle nécessaire pour supporter des conditions extrêmes, mais sa fiabilité dépend intrinsèquement d'une maîtrise rigoureuse des paramètres opératoires comme l'intensité et la protection gazeuse.

Dans ce contexte, l'Assurance Qualité (AQ) devient un impératif stratégique, car une simple erreur d'exécution peut engendrer des défauts tels que les porosités, les projections ou les caniveaux, compromettant gravement la sécurité et la rentabilité. Face à la complexité de ces variables, notre projet propose une solution numérique innovante sous la forme d'un logiciel de diagnostic intelligent.

Cet outil, conçu pour assister les ingénieurs et techniciens, analyse les données géométriques, les facteurs environnementaux et les paramètres de soudage pour identifier avec précision l'origine des défauts et proposer des remèdes correctifs immédiats, s'inscrivant ainsi directement dans la modernisation des processus de contrôle et d'optimisation de la qualité industrielle.

Chapitre I : Étude des Procédés de Soudage à l'Arc (TIG et MIG/MAG)

I.1. Principes et Mécanismes de Fusion (MIG /MAG et TIG)

Les procédés de soudage TIG et MIG/MAG reposent sur la fusion localisée des métaux par un arc électrique établi sous protection gazeuse. Le procédé TIG utilise une électrode réfractaire non fusible en tungstène, tandis que le MIG/MAG emploie un fil-électrode fusible continu qui sert également de métal d'apport. Cette fusion contrôlée garantit la continuité métallurgique et la haute résistance mécanique des assemblages industriels.

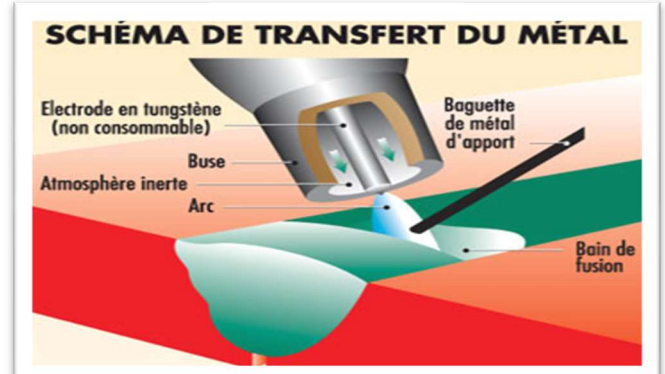
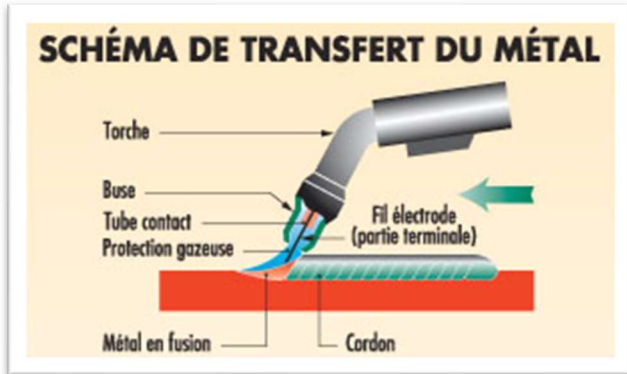


Figure 01 : Schéma de transfert du métal (MIG/MAG) [01]. Figure 02 : Schéma de transfert du métal (TIG) [02].

I.1.1 Étude Thermo physique et Dynamique du Soudage MIG/MAG : Analyse des Mécanismes de Fusion

Dans la pratique industrielle, le soudage MIG/MAG est souvent perçu comme un simple procédé semi-automatique. Pourtant, une analyse fine révèle une interaction complexe entre l'apport calorifique et la dynamique des fluides. Cette étude se propose d'examiner les variables thermodynamiques qui régissent la formation du cordon de soudure.

Bilan Énergétique et Transfert Thermique L'efficacité d'un soudage dépend de l'énergie linéaire introduite dans la pièce, notée E (en J/mm). Elle est définie par la relation :

$$E = \eta \frac{U \cdot I}{v} \quad [3]$$

- U est la tension de l'arc (V).
- I est l'intensité du courant (A).
- v est la vitesse d'avance (mm/s).
- η représente le rendement thermique du procédé (généralement compris entre 0,8 et 0,85 pour le MIG/MAG).

Une part importante de cette énergie est consommée par l'élévation de température du fil-électrode avant même qu'il n'atteigne l'arc, en raison de la résistivité du matériau sur la longueur libre (le stick-out). Ce préchauffage par effet Joule réduit l'énergie nécessaire à l'arc pour assurer la fusion, augmentant ainsi le taux de dépôt.

I.1.2 Modélisation de la Colonne d'Arc (Plasma)

L'arc n'est pas un conducteur ohmique standard. Sa conductivité thermique et électrique dépend de la température du plasma. La densité de courant J est régie par l'équation de transport des charges :

$$J = \sigma (E + v \cdot B) \quad [4]$$

Ici, la force de Lorentz ($J * B$) induit un mouvement centripète dans la goutte de métal liquide. C'est ce qu'on appelle l'effet de pincement magnétique (Pinch Effect). Lorsque la force magnétique dépasse la tension de surface du métal liquide (γ) la goutte se détache. Ce seuil critique définit le passage du régime globululaire au régime Spray [5].

I.1.3 Dynamique du Bain de Fusion : L'Effet Marangoni

Une fois le métal transféré, la géométrie de la pénétration est dictée par la convection au sein du bain. Le coefficient de température de la tension de surface ($\frac{d\gamma}{dT}$) joue un rôle majeur.

- Si $\frac{d\gamma}{dT} < 0$, le métal liquide s'écoule du centre vers les bords, créant un cordon large et peu profond.
- L'ajout d'éléments actifs dans le gaz (cas du MAG avec le O_2 ou le CO_2) peut inverser ce gradient, favorisant une pénétration centrale plus étroite et profonde [6].

I.1.4 Comportement Métallurgique et Gaz de Protection

Le choix du gaz n'est pas qu'une question de protection contre l'oxydation ; c'est un levier de contrôle thermodynamique.

L'Hélium (souvent ajouté en MIG) possède une conductivité thermique élevée, ce qui élargit le profil de pénétration.

Le CO_2 (en MAG) se dissocie via une réaction endothermique : $CO_2 = CO + \frac{1}{2} O_2$. Cette dissociation absorbe de l'énergie au cœur de l'arc et la restitue à la périphérie lors de la recombinaison, ce qui influence directement la stabilité de la zone cathodique [7].

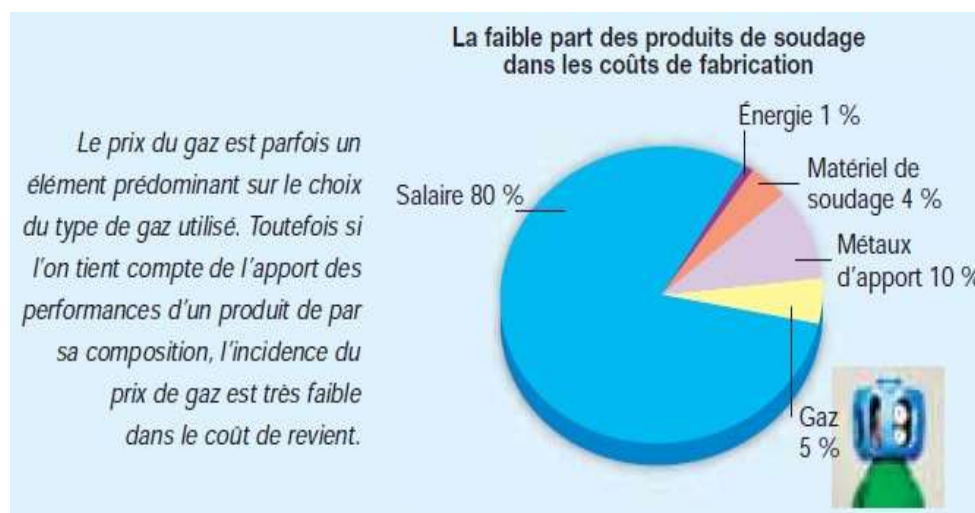


Figure 03 : Répartition des coûts de fabrication en soudage et influence relative du prix du gaz.[08].

I.1.5 Synthèse Technique pour l'Ingénierie

Le pilotage d'une cellule de soudage robotisée impose une compréhension stricte de l'interdépendance des paramètres. Par exemple, une augmentation de la tension U sans ajuster la vitesse de fil conduit à un arc trop long, augmentant l'instabilité et favorisant l'absorption

d'azote atmosphérique, source de porosités. À l'inverse, le mode pulsé permet de s'affranchir des instabilités du mode globulaire en contrôlant électroniquement le détachement de la goutte par une modulation du courant $I(t)$ [9].

I.2. Domaines d'Application et Paramètres de Contrôle Opérateur (MIG/MAG et TIG)

Le choix d'un procédé de soudage en milieu industriel ne relève jamais du hasard ; il résulte d'une analyse rigoureuse combinant les exigences de productivité et l'intégrité métallurgique de l'assemblage. Si le MIG/MAG s'impose par sa vitesse de dépôt, le TIG demeure la référence absolue pour la compacité et la santé radiographique des joints.

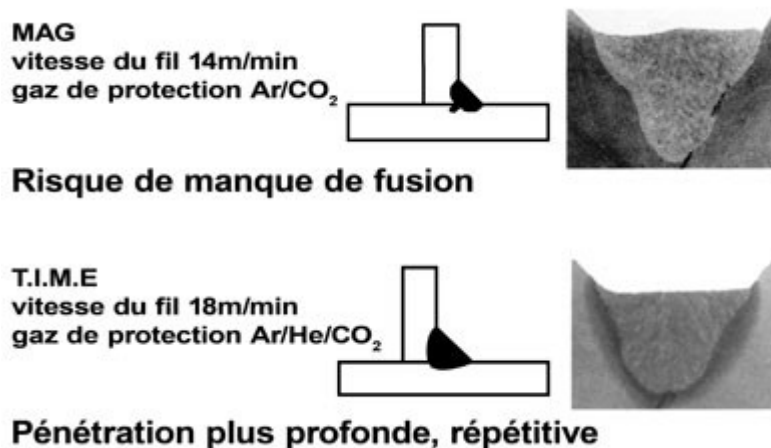


Figure 04 : Comparaison du soudage T.I.M.E. avec le soudage MIG/MAG [10].

I.2.1. Critères de sélection et domaines d'application

L'arbitrage entre ces deux procédés repose essentiellement sur la nature du matériau et l'épaisseur à assembler.

Le MIG/MAG (Productivité de masse) : C'est le moteur de la construction charpentière et de l'industrie automobile. Le MAG est privilégié pour les aciers ferriques où l'ajout de gaz actifs (CO_2 , O_2) stabilise l'arc et optimise la mouillabilité du bain. À l'inverse, le MIG reste le standard pour les alliages d'aluminium et les métaux non ferreux, où l'inertie totale du gaz est indispensable pour éviter toute réaction d'oxydation parasite.

Le TIG (Qualité et précision) : Bien que plus lent, le TIG est irremplaçable pour le soudage de racine sur les tuyauteries à haute pression (nucléaire, pétrochimie) et sur les faibles épaisseurs (tôlerie fine). Sa capacité à séparer l'apport thermique du métal d'apport permet au soudeur une précision chirurgicale dans la gestion du bain de fusion [11].

I.2.2. Les leviers de contrôle opératoire

La qualité du cordon est le produit direct de l'interaction entre plusieurs variables critiques que l'ingénieur doit ajuster avec précision.

- La synergie Courant / Tension

Dans le procédé MIG/MAG, le couple (U , I) définit le régime de transfert (court-circuit, spray, etc.). Une erreur courante consiste à augmenter la tension (U) pour compenser un manque de pénétration, ce qui aboutit souvent à un élargissement excessif du cordon et à des projections.

En revanche, en TIG, l'intensité (I) est le paramètre directeur ; elle doit être modulée avec finesse pour éviter l'effondrement du bain, surtout lors du soudage en position.

- Le débit et la dynamique du gaz de protection

Le rôle du gaz dépasse la simple protection contre l'azote atmosphérique. Son débit doit être calibré selon la règle empirique de 10 à 12 fois le diamètre du fil. Un débit trop élevé génère des turbulences (aspiration d'air par effet Venturi), tandis qu'un débit insuffisant conduit à des porosités internes indétectables à l'œil nu [12].

- La vitesse d'avance et l'apport calorifique (Heat Input)

L'énergie linéaire, calculée par $E = \eta \frac{U \cdot I}{v}$, est le paramètre vital pour la métallurgie. Une vitesse d'avance trop faible sur un acier à haute limite élastique (HLE) peut entraîner un grossissement de grain dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT), ruinant ainsi les propriétés de résilience de l'assemblage [13].

I.2.3. Tableau Récapitulatif : Comparaison Technique et Opératoire (MIG/MAG vs TIG)

Critères de Comparaison	Procédé MIG/MAG (GMAW)	Procédé TIG (GTAW)
Type d'électrode	Fusible (Fil-électrode continu)	Non fusible (Tungstène réfractaire)
Nature de l'arc	Arc instable sans régulation (Auto-régulation)	Arc très concentré et stable
Vitesse de dépôt	Élevée (Idéal pour la production)	Faible (Précision manuelle)
Épaisseurs types	Moyennes à fortes (≥ 1.5 mm)	Très fines à moyennes (0.5 - 6 mm)
Gaz de protection	Argon, CO ₂ , Mélanges Ar + CO ₂	Argon pur, Hélium, Argon Hydrogène
Qualité métallurgique	Bonne (Risque de projections)	Excellente (Santé radiographique)
Énergie de soudage	Apport thermique moyen	Apport thermique localisé et précis
Automatisation	Très facile (Robotique industrielle)	Complexe (Nécessite des asservissements)
Coût de revient	Économique (Main d'œuvre moins chère)	Onéreux (Temps de soudage long)
Applications phares	Automobile, Charpente, Chaudronnerie	Nucléaire, Aéronautique, Tuyauterie inox

Ce tableau met en évidence l'arbitrage technico-économique entre la productivité et la précision

- **Productivité (Rendement) :** Le MIG/MAG l'emporte largement grâce à son fil-électrode continu. C'est le procédé de "vitesse" par excellence pour les constructions massives. Le TIG est intrinsèquement lent car l'apport de métal est manuel et séparé de la source de chaleur.

- **Qualité et Esthétique :** Le TIG est le roi de la finition. Il produit des soudures sans projections (grattons) et d'une pureté métallurgique inégalée, indispensable pour le secteur nucléaire ou l'inox alimentaire.
- **Gaz et Interaction :** En TIG, on reste sur de l'Argon pur (neutre). En MAG, on utilise des mélanges actifs (Ar+CO₂) pour "mouiller" le bain de fusion et augmenter la pénétration dans les aciers carbone.

Chapitre II : Analyse des Paramètres Influençant la Morphologie du Cordon de Soudure

II.1. Les Paramètres Électriques

Les paramètres électriques, principalement l'intensité, la tension et la vitesse d'avance, dictent directement l'apport thermique introduit lors du soudage.

II.1.1. Intensité du courant (I) et vitesse de dévidage

Dans le procédé MIG/MAG, l'intensité I n'est pas réglée de manière indépendante comme en soudage à l'électrode enrobée (MMA) ; elle est étroitement liée mécaniquement à la vitesse d'amenée du fil.

- **Le mécanisme** : Plus la vitesse de dévidage augmente, plus la quantité de métal à fondre est importante. Cela sollicite automatiquement une intensité I plus élevée de la part de la source de courant afin de maintenir l'équilibre de fusion de l'arc électrique.
- **L'effet sur le cordon** : L'intensité est le moteur principal de la pénétration. Une valeur élevée de I accroît la densité d'énergie au centre de l'arc, ce qui permet de creuser plus profondément dans le métal de base. À l'inverse, une intensité trop faible se traduit souvent par un manque de liaison (phénomène de collage), car l'apport thermique est insuffisant pour fusionner correctement le métal d'apport avec la pièce à assembler.[14]

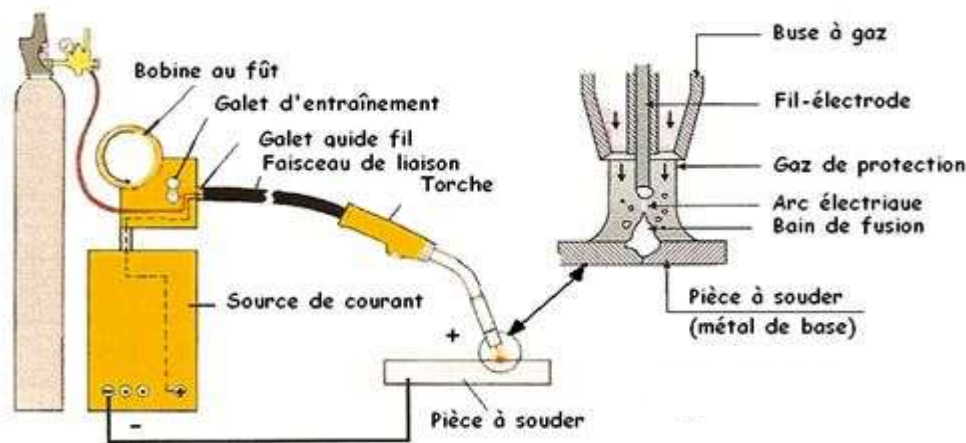


Figure 05 : Schéma poste à souder MAG [15].

II.1.2. Tension de l'arc (U) et longueur d'arc

La tension U est le paramètre qui gère la "géométrie de surface" du cordon.

Le mécanisme : Elle définit la distance physique entre le bout du fil et le bain de fusion (la longueur de l'arc).

L'effet sur le cordon :

- Si U est élevée : L'arc s'allonge et s'élargit. Le cordon devient alors large et plat, avec une excellente mouillabilité sur les bords. Attention toutefois : une tension excessive peut provoquer des morsures (caniveaux) et une perte d'éléments d'alliage par oxydation.
- Si U est faible : L'arc est court. Le cordon devient étroit et bombé (surépaisseur). Si elle est trop basse, le fil vient "taper" dans le bain, provoquant des projections instables [16].

II.1.3. Influence de la polarité (DC+ / DC-)

Le choix de la borne sur laquelle est branchée la torche influe radicalement sur la répartition de la chaleur (Q).

- **Polarité Positive (DC+ / DCEP)** : C'est la configuration standard pour le MIG/MAG. Le fil est à l'anode.

Avantage : Environ 70% de la chaleur est concentrée sur l'extrémité du fil, ce qui stabilise le transfert de métal. Cela permet aussi un effet de "décapage ionique" (nettoyage de la couche d'alumine), indispensable pour le soudage de l'aluminium.

- **Polarité Négative (DC- / DCEN)** : Le fil est à la cathode.

Usage : La chaleur est davantage concentrée sur la pièce. Bien que cela augmente le taux de dépôt (le fil fond très vite), l'arc devient instable et erratique en MIG/MAG classique. On l'utilise principalement avec certains fils fourrés spécifiques (Sans gaz) [17].

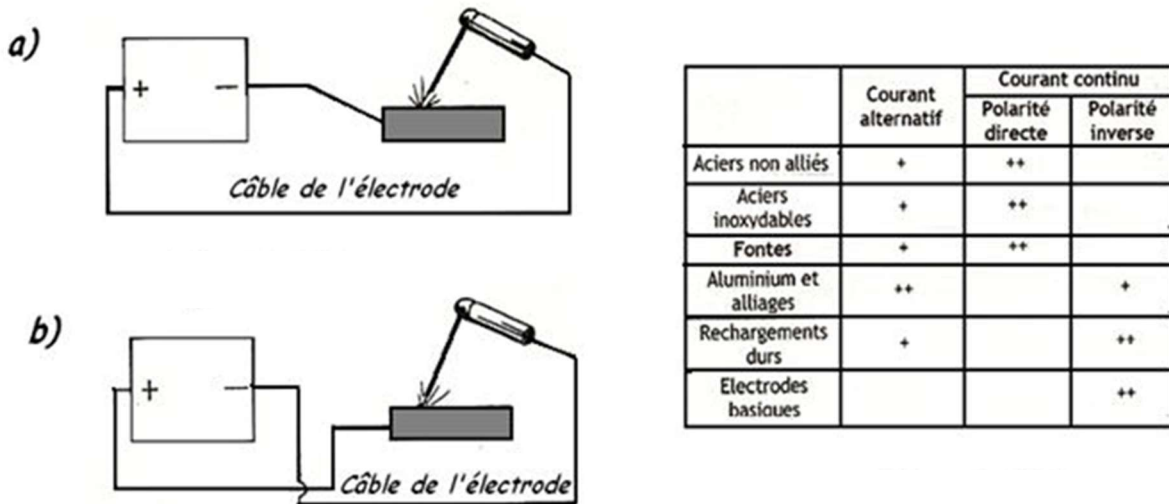


Figure 06 : Les types de polarité en courant continu (CC) ; Tableau de sélection du courant selon le matériau [18].

II.1.4. Rôle de l'inductance (Réglage de la dynamique de l'arc)

L'inductance est un paramètre électronique qui agit comme un amortisseur de courant, particulièrement crucial lors du soudage en régime de transfert par court-circuit (Short-arc).

- **Le mécanisme physique** : En mode court-circuit, le fil touche périodiquement le bain de fusion, créant des pics d'intensité brutaux. L'inductance ralentit la vitesse de montée du courant (di/dt) lors de chaque contact.

L'impact sur le cordon :

- **Faible inductance (Arc dit "dur")** : La rupture du court-circuit est quasi instantanée et violente. Cela provoque une explosion de la gouttelette de métal, générant un taux élevé de projections (grattons). Le cordon résultant est étroit, avec des stries de solidification marquées.

- **Forte inductance (Arc dit "doux")** : La montée en courant est freinée, permettant un détachement de la goutte beaucoup plus souple et régulier. Le bain de fusion est plus calme, les projections sont minimisées et la mouillabilité est accrue, ce qui donne un cordon plus large, plat et esthétique [19].

II.2. Les Paramètres Cinématiques et Géométriques (Variables Opératoires)

Les paramètres cinématiques et géométriques, tels que la vitesse de soudage, l'angle de la torche et la préparation des bords, régissent le déplacement de la source de chaleur et la configuration du joint. Ils déterminent directement la forme du cordon de soudure, le taux de dilution et la bonne pénétration du métal.

II.2.1. Vitesse d'avance (V_a) : Équilibre entre productivité et intégrité

La vitesse d'avance ne doit pas être perçue comme un simple paramètre de temps, mais comme le régulateur de la densité d'énergie linéique.

- **Le Phénomène de Mouillage** : Pour qu'un cordon soit sain, le métal liquide doit "mouiller" les bords du chanfrein. Si V_a est trop élevée, la tension superficielle du bain de fusion devient prédominante par rapport aux forces gravitationnelles et à la pression de l'arc, empêchant l'étalement du métal. C'est ce qui crée physiquement le creux caractéristique du caniveau.
- **L'Apport Thermique (Calcul)** : Elle intervient au dénominateur de la formule de l'énergie : $E = \eta \frac{U \cdot I}{v}$. Une légère variation de la vitesse a donc un impact exponentiel sur la vitesse de refroidissement ($\Delta_{f_{8/5}}$), influençant directement la dureté de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) [20].

II.2.2. Le Stick-out : La résistance ohmique du fil

La longueur libre du fil (L_1) agit comme une résistance variable intégrée au circuit.

- **Préchauffage par Effet Joule** : Avant d'être fondu par l'arc, le fil traverse cette distance où il s'échauffe par résistance ($Q = R \cdot I^2 \cdot t$). Un Stick-out long augmente la température du fil, ce qui diminue la tension d'arc réelle et modifie le mode de transfert de métal (par exemple, passage d'un transfert "Gouttelette" à un transfert "Court-circuit").
- **Stabilité du Bain** : Un Stick-out instable provoque des fluctuations de l'intensité (I). Dans notre logiciel, nous considérons qu'un Stick-out mal maîtrisé est la cause primaire des projections (spalters) qui souillent la surface de la pièce. [21].

II.2.3. L'Inclinaison de la torche : Vecteurs de force de l'arc

L'angle de la torche décompose la force de l'arc en deux vecteurs : un vecteur vertical (pénétration) et un vecteur horizontal (poussée du bain).

- **L'Angle de Travail (Work Angle)** : Généralement fixé à 90° pour une soudure bout à bout, il doit être ajusté pour les soudures d'angle (45°) afin d'assurer une symétrie parfaite des "gorges" du cordon.
- **L'Angle de Déplacement (Travel Angle)** : En Tirant (Backhand) : Le flux de gaz et l'arc préchauffent la zone déjà soudée. Cela stabilise le bain et permet une pénétration "en clou" très profonde.
- **En Poussant (Forehand)** : L'énergie est projetée vers la zone froide. Le bain de fusion a tendance à s'étaler devant l'arc, ce qui limite la pénétration mais donne un aspect de surface très lisse [22].

II.2.4. Position de soudage : La lutte contre la force gravitationnelle

La position transforme le bain de fusion en une entité physique instable.

- **Forces en présence** : Le maintien du bain dépend de l'équilibre entre la pression de l'arc, la tension superficielle et la gravité.
- **Positions Spéciales** :
 - **En Corniche (PC/2G)** : La gravité risque de créer un affaissement du cordon vers le bas (asymétrie).
 - **Verticale Montante (PF/3G)** : C'est la position la plus complexe car elle nécessite un apport de chaleur maîtrisé pour permettre une solidification rapide afin de "soutenir" le métal qui arrive. C'est ici que l'expérience du soudeur (ou la précision des paramètres du logiciel) est la plus sollicitée pour éviter l'effondrement.

Conclusion du Les Paramètres Cinématiques et Géométriques

L'interaction de ces quatre paramètres (Vitesse, Stick-out, Inclinaison, Position) définit ce que l'on appelle la fenêtre opératoire.

Notre logiciel a pour but de définir les limites de cette fenêtre afin d'assurer que la morphologie du cordon réponde aux exigences de [la norme ISO 5817](#).

- **La norme ISO 5817** permet de définir si les imperfections des soudures sont dans les tolérances admissibles ou non.
Les soudures concernées sont les soudures par fusion à l'exception du soudage par faisceau. Afin de déterminer l'acceptabilité des indications des soudures, la norme va distinguer 3 niveaux de qualité [23].

II.3. Les Paramètres Physiques et Chimiques

Au-delà des mouvements mécaniques et des réglages électriques, la qualité d'un joint soudé dépend intrinsèquement des interactions physico-chimiques au sein de l'arc. Ce paragraphe analyse l'influence du milieu gazeux et des propriétés du métal d'apport.

II.3.1. Nature et composition du gaz de protection (Effet sur l'énergie ionisante)

Le gaz de protection définit l'atmosphère thermodynamique de l'arc. Son rôle va bien au-delà de la simple protection inerte.

- **Le Potentiel d'ionisation et Conductivité Thermique** : L'arc électrique est un plasma. Plus le gaz a une conductivité thermique élevée (comme l'Hélium), plus l'énergie est transférée efficacement vers les bordures du bain de fusion, créant un profil de pénétration large et parabolique. À l'inverse, l'Argon concentre l'énergie au centre, créant une pénétration dite "en doigt".
- **L'Effet de l'Oxygène et du CO₂ (Gaz Actifs)** : En soudage MAG, l'ajout de gaz oxydants réduit la tension superficielle du fer liquide. Cela permet aux gouttelettes de métal de se détacher plus rapidement et d'être plus petites (Transfert Spray-Arc). Cependant, un excès de O₂ peut entraîner une décarburation du métal et une perte de propriétés mécaniques.
- **Le Phénomène de dissociation-recombinaison** : Les gaz diatomiques (Ar+H₂, Ar+CO₂) absorbent de l'énergie pour se dissocier dans le cœur de l'arc (zone très chaude) et restituent cette énergie lors de leur recombinaison à la surface du bain de fusion (zone plus froide), augmentant ainsi le rendement thermique global [24].

II.3.2. Débit de gaz et stabilité de la protection laminaire

La protection gazeuse doit être vue comme un "bouclier fluide" dont la stabilité est précaire.

- **Nombre de Reynolds et Turbulence** : L'écoulement du gaz doit rester en régime laminaire (Nombre de Reynolds faible). Si la vitesse de sortie du gaz dépasse un seuil critique, l'écoulement devient turbulent. Cette turbulence crée des micro-vortex qui aspirent l'air ambiant (riche en Azote N₂ et Oxygène O₂) directement dans le métal en fusion.
- **L'influence de la distance Buse-Pièce (D.P.P)** : Si la distance est trop grande, la colonne de gaz perd sa rigidité et devient sensible aux courants d'air extérieurs. Notre logiciel doit signaler qu'un débit de 15 L/min peut être insuffisant si la buse est à plus de 20 mm de la pièce.
- **Contamination par l'Azote** : L'azote est l'ennemi invisible ; une protection défaillante entraîne l'absorption de N₂ qui provoque une fragilisation par vieillissement et des porosités vermiculaires.

II.3.3. Diamètre et nature du fil-électrode (Densité de courant)

Le fil est le siège de phénomènes électromagnétiques complexes qui dictent la morphologie du dépôt.

- **L'Effet de Pincement (Pinch Effect)** : La densité de courant (J) génère des forces électromagnétiques de Lorentz qui compriment l'extrémité du fil en fusion. Plus le

diamètre du fil est petit, plus cette force de pincement est intense, favorisant un détachement des gouttes très stable et sans projections.

- **Rapport de Fusion (Déposition Rate) :** Un fil de faible diamètre atteint son point de fusion plus rapidement (vitesse de dévidage élevée), ce qui permet de réaliser des passes fines et précises, idéales pour le contrôle de la pénétration en racine.
- **Rôle des Désoxydants :** Les fils-électrodes modernes contiennent des agents fixateurs comme le Titane (Ti) ou l'Aluminium (Al) en plus du Si et Mn. Ces éléments agissent comme des "nettoyeurs" chimiques qui neutralisent les oxydes résiduels présents sur la surface de la tôle, garantissant une zone de liaison propre (fusion parfaite).

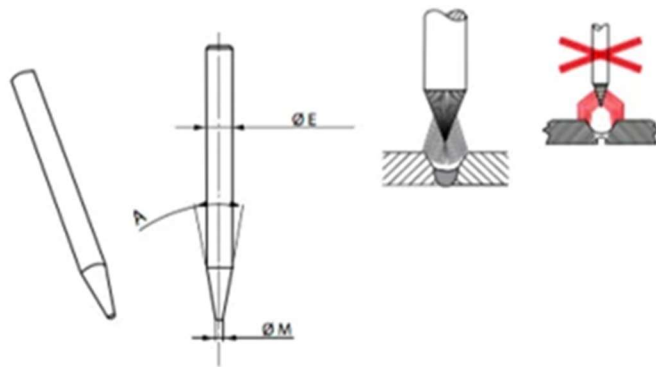


Figure 07 : Géométrie de l'électrode de tungstène et influence sur le cordon de soudure [25].

La synergie entre la physique du plasma (gaz) et la dynamique électromagnétique (fil) détermine la stabilité du transfert métallique. Une déviation de ces paramètres physiques transforme le bain de fusion en un milieu chimiquement instable, propice à l'apparition de défauts structurels majeurs.

II.4. Facteurs Environnementaux

Analyse des interactions Milieu-Procédé :

L'acte de soudage ne se limite pas à la fusion d'un métal par un arc électrique ; il s'agit d'une réaction thermochimique complexe s'opérant dans un milieu ouvert.

Par conséquent, les facteurs environnementaux agissent comme des catalyseurs de défauts s'ils ne sont pas rigoureusement maîtrisés.

II.4.1. Humidité relative : Cinétique de l'hydrogène et pathologie des porosités

L'humidité atmosphérique est la source la plus critique de contamination gazeuse. Sa présence, même à l'état de traces, peut compromettre l'intégrité structurelle.

- **Le mécanisme de dissociation moléculaire :** Sous l'effet intense du plasma de l'arc (atteignant des températures de 5000 K à 20000 K), les molécules de vapeur d'eau (H_2O) subissent une dissociation thermique instantanée. L'hydrogène ainsi libéré passe à l'état

atomique (H^+), une forme extrêmement réactive capable de pénétrer la maille cristalline du fer.

- **Solubilité et occlusion gazeuse** : La solubilité de l'hydrogène dans l'acier suit une loi de variation brutale : elle est maximale à l'état liquide et quasi nulle à l'état solide. Lors du refroidissement rapide du cordon, l'hydrogène n'a pas le temps de diffuser vers l'extérieur et se retrouve "emprisonné". Si la concentration est élevée, il s'agglomère pour former des porosités sphéroïdales.
- **La Fissuration à Froid (Phénomène différé)** : C'est le danger majeur des aciers carbone-manganèse. L'hydrogène diffusible migre vers les zones de fortes contraintes (fond de fissure, inclusions). Associé à une structure fragile (Martensite) et à des contraintes résiduelles de traction, il provoque une rupture fragile qui peut apparaître plusieurs heures, voire plusieurs jours après le soudage [26].

II.4.2. Vitesse du vent : Instabilité du flux et rupture de l'isolements

Le succès des procédés sous protection gazeuse (MIG/MAG, TIG) dépend du maintien d'un environnement stérile autour du bain de fusion.

- Transition du régime laminaire au régime turbulent : Pour une protection efficace, le gaz doit sortir de la buse selon un flux laminaire. Un vent transversal, même modéré ($> 2 \text{ m/s}$ pour le MIG/MAG), perturbe cette stabilité. Selon les principes de la dynamique des fluides, le vent crée une zone de basse pression (dépression) derrière la buse, aspirant l'air ambiant dans la colonne de protection [27].
- Conséquences métallurgiques de la contamination :
 - **L'Oxygène** : Provoque une oxydation du bain (perte d'éléments d'alliage comme le Silicium et le Manganèse) et augmente les projections.
 - **L'Azote** : C'est l'élément le plus nocif pour la résilience. Il s'insère dans la structure atomique, augmentant la dureté mais rendant le cordon extrêmement cassant, tout en générant des porosités vermiculaires (en forme de vers).

II.4.3. Température ambiante et préchauffage : Maîtrise des cycles thermiques

La température de la pièce avant soudage est le paramètre régulateur de la vitesse de refroidissement, notée $\Delta_{f_{8/5}}$ (temps de refroidissement entre 800°C et 500°C).

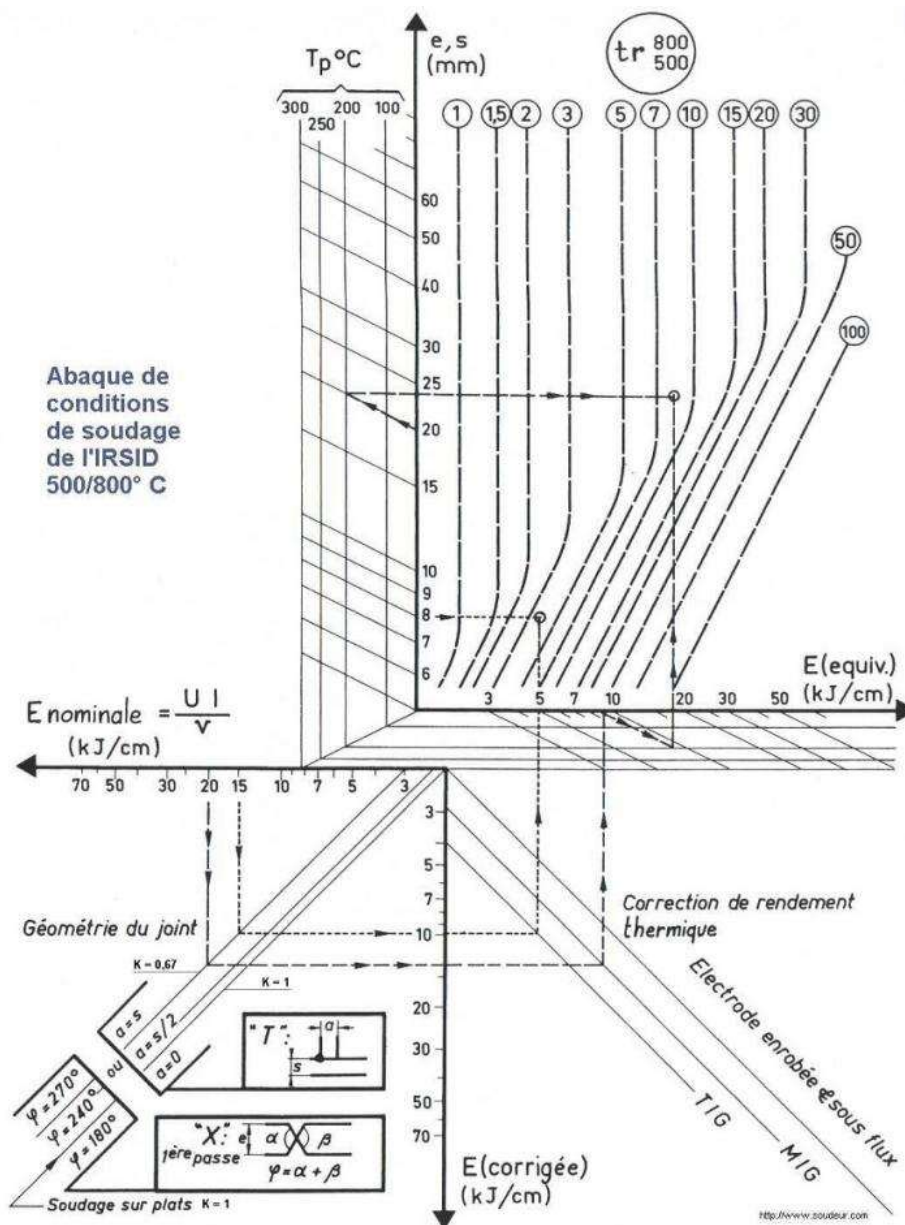


Figure 08 : Abaque de l'IRSID pour la détermination du temps de refroidissement tr_{500}^{800} [28].

- **Le Gradient Thermique** : Une température ambiante basse accentue le gradient thermique (dT/dx). Plus ce gradient est élevé, plus l'extraction de la chaleur par conduction vers le reste de la pièce est rapide. Un refroidissement trop brutal (effet de trempe) transforme l'Austénite en Martensite, une phase très dure mais dépourvue de ductilité.
- **Rôle thermodynamique du Préchauffage** : Ralentissement de la solidification : Permet aux gaz (notamment l'hydrogène) de s'échapper avant que le métal ne se fige.
- **Réduction des contraintes** : En diminuant l'écart de température entre la zone soudée et la zone froide, on réduit les dilatations et contractions différentielles, minimisant ainsi les déformations et les risques de fissuration.

- **Contrôle de la ZAT** : Assure une transition plus douce des propriétés métallurgiques dans la Zone Affectée Thermiquement [29].

Résumé :

En somme, les facteurs environnementaux dictent la fenêtre de soudabilité opératoire. Une approche rigoureuse impose non seulement le contrôle des paramètres machine (U, I, V), mais aussi une surveillance stricte des conditions de site, car l'humidité et le vent peuvent rendre caduque une préparation mécanique parfaite.

II.5. Aspects Métallurgiques

Transformations et Intégrité Structurale

La métallurgie du soudage se distingue de la métallurgie classique par la rapidité des cycles thermiques. Cette section analyse les modifications physico-chimiques qui s'opèrent lors du passage de l'état liquide à l'état solide.

II.5.1. Dilution entre métal d'apport et métal de base

La dilution (D) est un phénomène crucial qui détermine la composition chimique finale du cordon de soudure.

- **Définition** : Elle représente la proportion de métal de base fondu qui se mélange au métal d'apport pour constituer le bain de fusion.
- **Calcul de la Dilution** : Elle est exprimée par le rapport : $D = \frac{A_{mb}}{A_{mb} + A_{ma}}$ [30], où A_{mb} est la section du métal de base fondu et A_{ma} la section du métal d'apport déposé.
- **Influence des paramètres** : Une intensité (I) élevée ou une vitesse de soudage faible augmentent la pénétration, et par conséquent, le taux de dilution. Une dilution mal maîtrisée peut altérer les propriétés mécaniques du joint si le métal de base contient des impuretés ou des éléments d'alliage incompatibles avec le fil.

II.5.2. Vitesse de refroidissement $\Delta_{f_{8/5}}$, et structure des grains

Le temps de refroidissement entre 800°C et 500°C, noté $\Delta_{f_{8/5}}$, est le paramètre cinétique qui dicte la microstructure de l'acier.

- **Cinétique de transformation** : Un refroidissement très rapide (petit $\Delta_{f_{8/5}}$) favorise la formation de structures de trempe comme la Martensite, très dure mais fragile. Un refroidissement lent favorise des structures plus ductiles comme la Ferrite et la Perlite.
- **Morphologie des grains** : La croissance des grains s'effectue de manière épi-axiale à partir de la ligne de fusion. On observe généralement une structure de grains colonnaires (dendritiques) orientés selon le flux thermique maximal [31].

II.5.3. Formation de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT)

La ZAT (ou HAZ - Heat Affected Zone) est la partie du métal de base qui n'a pas fondu, mais dont la microstructure a été modifiée par la chaleur.

- **Zones de transition** : On y distingue plusieurs sous-zones : la zone de croissance de grain (surchauffe), la zone de recristallisation et la zone de revenu.
- **Fragilisation** : C'est souvent dans la ZAT que se produisent les ruptures, car elle peut présenter des baisses de résilience ou des augmentations de dureté excessives selon le cycle thermique subi [32].

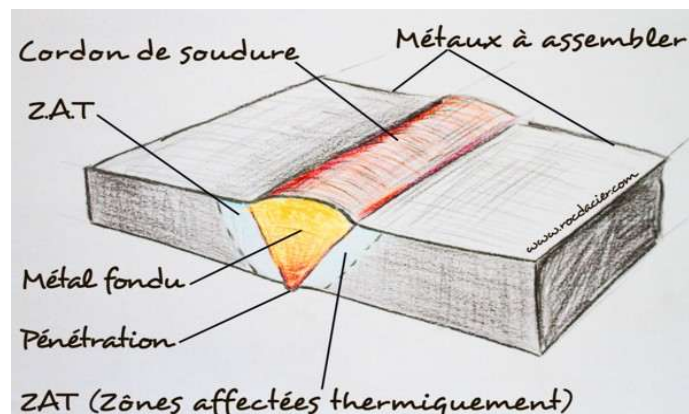


Figure 09 : Représentation schématique d'un joint soudé et morphologie de la coupe transversale [33].

II.5.4. Le Carbone Équivalent (C_{eq}) : Indice de soudabilité

Le carbone équivalent est une valeur numérique permettant d'évaluer l'aptitude d'un acier à être soudé sans risque de fissuration à froid.

Il synthétise l'influence du carbone et des autres éléments d'alliage (Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu) sur la trempabilité de l'acier. Plus le C_{eq} est élevé, plus le risque de formation de martensite fragile est grand.[17]

L'Équation (selon l'IIW - Institut International de la Soudure) :

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Critères d'interprétation :

- $C_{eq} < 0,40$: Excellente soudabilité, peu de risques de fissuration.
- $0,40 < C_{eq} < 0,45$: Soudabilité moyenne, préchauffage recommandé.
- $C_{eq} > 0,45$: Soudabilité difficile, préchauffage et contrôle strict de l'hydrogène impératifs [34].

Résumé :

L'étude métallurgique démontre que la qualité d'une soudure ne se limite pas à sa géométrie de surface. Le contrôle de la dilution, de la vitesse de refroidissement et du carbone équivalent constitue le triptyque indispensable pour garantir la pérennité mécanique de l'assemblage et prévenir les ruptures fragiles.

II.6. Configuration de l'Assemblage

Géométrie et Préparation des Bords

La configuration de l'assemblage définit la disposition relative des pièces et la forme de l'espace à remplir par le métal d'apport. Elle conditionne directement l'accessibilité de l'arc, la répartition de la chaleur et la résistance mécanique finale du joint.

II.6.1. Types de joints et préparations (Chanfreinage)

Le choix du type de joint dépend de l'épaisseur des matériaux et des sollicitations mécaniques prévues.

- **Assemblage à franc-bord** : Utilisé pour les faibles épaisseurs (généralement < 6 mm), où la pénétration naturelle de l'arc suffit à lier les deux faces.
- **Le Chanfreinage (V, X, U)** : Pour les fortes épaisseurs, il est nécessaire d'usiner les bords pour permettre à l'électrode d'atteindre la racine du joint. La géométrie du chanfrein (angle d'ouverture et méplat) doit être optimisée pour assurer une fusion complète tout en limitant le volume de métal déposé, réduisant ainsi les déformations thermiques.

II.6.2. Le Jeu à la racine (Root Gap)

Le jeu à la racine est l'espace libre laissé entre les deux pièces avant le pointage.

- **Fonction technique** : Il permet au flux de gaz et à l'arc de pénétrer jusqu'à la face envers de la soudure.
- **Conséquences d'un mauvais réglage** : Un jeu trop étroit entraîne un manque de pénétration (défaut de continuité), tandis qu'un jeu trop large provoque des effondrements du bain de fusion ou des perforations. Dans un système automatisé, ce paramètre doit être constant sur toute la longueur du joint.

II.6.3. Positionnement et Bridage (Contraintes de déformation)

Le soudage induit des retraits thermiques lors de la solidification qui tendent à déformer l'assemblage.

- **Le Bridage** : L'utilisation de dispositifs mécaniques (clameaux, gabarits) est indispensable pour maintenir les pièces dans la configuration géométrique souhaitée.
- **Contraintes résiduelles** : Un bridage trop rigide peut cependant empêcher la libre contraction du métal, augmentant le niveau de contraintes internes et favorisant les risques de fissuration, notamment si le carbone équivalent (C_{eq}) est élevé [35].

Résumé :

La configuration de l'assemblage constitue le cadre géométrique dans lequel s'expriment les phénomènes physiques du soudage. Une préparation rigoureuse des bords et une maîtrise du jeu à la racine sont les garants d'une pénétration saine et d'une stabilité dimensionnelle de l'ouvrage final.

II.7. Caractéristiques Mécaniques du Joint Soudé

L'objectif ultime du soudage est d'obtenir une continuité métallique dont les propriétés mécaniques sont, au minimum, équivalentes à celles du métal de base. Cette section traite des critères de performance qui valident la conformité de l'assemblage.

II.7.1. Résistance à la Traction (R_m)

C'est la capacité de la soudure à résister à des forces d'étirement sans se rompre.

- **Critère d'acceptation :** La rupture doit idéalement se produire dans le métal de base et non dans le cordon de soudure ou la ZAT.
- **Influence des paramètres :** Une mauvaise pénétration ou des inclusions de laitier réduisent la section efficace, affaiblissant ainsi la résistance globale du joint.

II.7.2. Ductilité et Allongement (A%)

La ductilité mesure la capacité du joint à se déformer plastiquement avant la rupture.

- **Importance du cycle thermique :** Un refroidissement trop brutal ($\Delta_{f_{8/5}}$ court) peut rendre la soudure fragile et cassante.
- **Essai de pliage :** Cet essai est souvent utilisé pour vérifier l'absence de fissures lors d'une déformation imposée, garantissant que la soudure peut absorber des contraintes sans rupture catastrophique.

II.7.3. Résilience (Essai Charpy - KCV)

La résilience définit la capacité du métal à absorber l'énergie d'un choc à une température donnée (souvent à 0°C ou -20°C).

- **Sensibilité de la ZAT :** La Zone Affectée Thermiquement est souvent la zone où la résilience chute à cause du grossissement des grains.
- **Rôle des gaz et du fil :** Un gaz de protection pur et un fil-électrode riche en éléments désoxygénant (comme le Manganèse) améliorent la ténacité du métal déposé.

II.7.4. Dureté (Vickers - HV)

Le profil de dureté à travers la soudure (Métal fondu / ZAT / Métal de base) permet de détecter les zones de fragilisation.

- **Le risque de dureté excessive :** Dans les aciers, une dureté supérieure à 350 HV dans la ZAT est souvent synonyme d'un risque élevé de fissuration à froid, lié à une structure martensitique.

- **Relation avec le carbone équivalent** : Plus le C_{eq} est élevé, plus le pic de dureté sera prononcé, nécessitant un préchauffage pour adoucir la structure [36].

Résumé :

Les caractéristiques mécaniques constituent le verdict final de l'opération de soudage. Elles sont le reflet direct de la maîtrise des cycles thermiques et de la pureté chimique du bain de fusion. Un déséquilibre dans l'apport d'énergie ou une contamination gazeuse se traduit immédiatement par une chute de la résilience ou une augmentation critique de la dureté.

II.8. Historique de la Pièce

Traçabilité et Antécédents Métallurgiques

L'historique d'une pièce mécanique est un paramètre souvent négligé, pourtant déterminant pour la réussite d'une opération de soudage, particulièrement dans le cadre de la maintenance ou de la réparation industrielle.

II.8.1. Traçabilité du matériau (Certificats matière)

La connaissance précise de la nuance d'acier est le point de départ de toute procédure.

- **Certificat 3.1** : Ce document fournit la composition chimique exacte (nécessaire au calcul du C_{eq}) et les caractéristiques mécaniques initiales (R_m , R_e).
- **Identification des impuretés** : Une pièce issue d'un lot ancien peut contenir des teneurs élevées en soufre (S) ou en phosphore (P), augmentant radicalement le risque de fissuration à chaud lors du soudage.

II.8.2. État de service et fatigue thermique

Une pièce ayant déjà travaillé en service possède un état métallurgique modifié.

- **Vieillessement et corrosion** : Si la pièce a été exposée à des milieux corrosifs (H_2S , milieu marin), elle peut avoir absorbé des éléments qui réagiront violemment avec l'arc électrique, créant des soufflures ou des porosités.
- **Cycles thermiques antérieurs** : Des opérations de soudage ou de traitement thermique précédentes peuvent avoir créé des zones de dureté locale ou des contraintes résiduelles cachées qu'il faut libérer par un recuit avant toute nouvelle intervention.

II.8.3. Préparation des surfaces dégradées

L'historique inclut également l'état de surface actuel de la pièce.

- **Contamination profonde** : Les résidus d'huile, de graisse ou de peinture incrustés dans les microfissures d'une pièce usagée sont des sources majeures de carbone et d'hydrogène.

- **Décapage et ressuage :** Pour une pièce ayant un historique de service lourd, un contrôle par ressuage (PT) ou magnétoscopie (MT) est impératif avant soudage pour s'assurer que l'on ne soude pas sur une fissure préexistante [37].

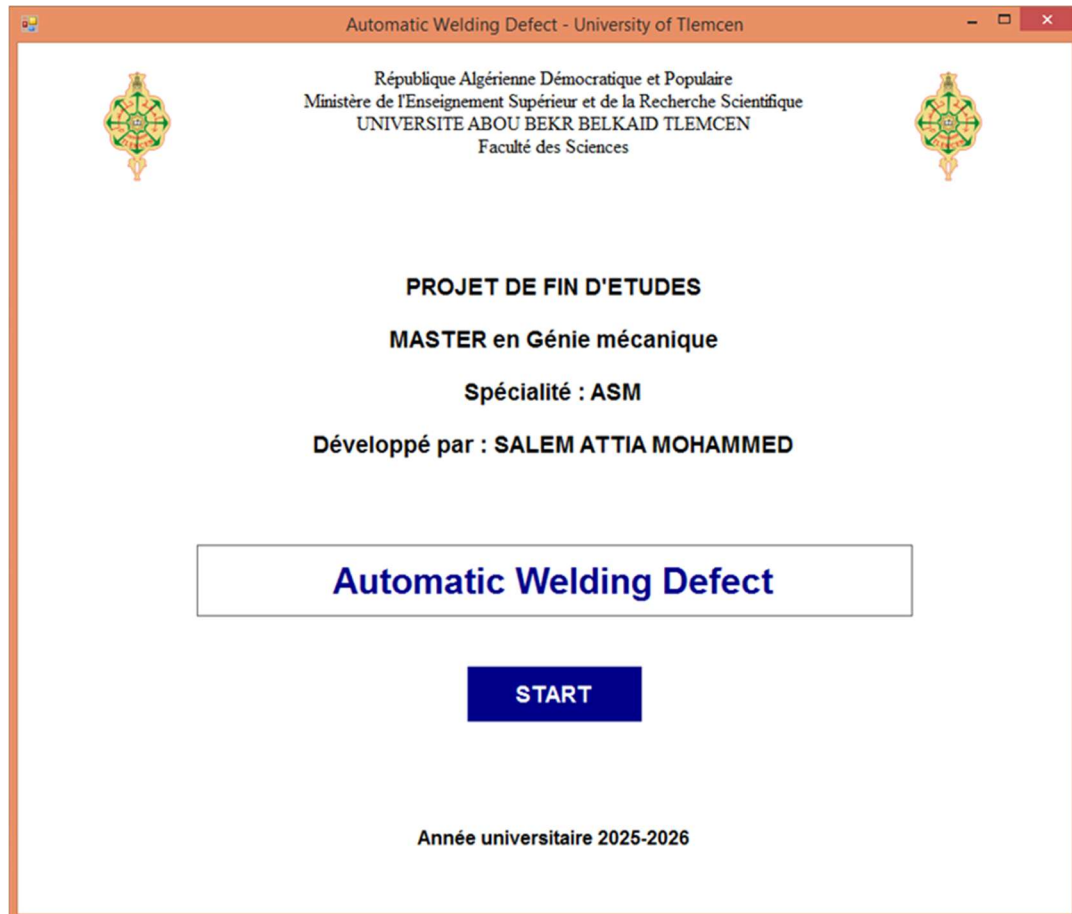
Synthèse pour votre rédaction :

L'historique de la pièce constitue le 'casier judiciaire' du matériau. Ignorer les antécédents thermiques ou chimiques d'un composant expose le soudeur à des réactions imprévisibles du bain de fusion, rendant la traçabilité aussi importante que le réglage des paramètres électriques.

Chapitre III : Conception et Développement de l'Application Informatique

III.1. Introduction au projet

Après avoir exposé dans le chapitre précédent les fondements physico-chimiques et métallurgiques qui régissent le procédé de soudage MIG/MAG/TIG., il devient impératif de traduire cette complexité technique en un outil d'aide à la décision. Le développement de cette application informatique s'inscrit dans une démarche de modernisation des ateliers de soudage, visant à réduire les erreurs humaines et à optimiser la qualité des joints.



III.1.1. Problématique et justification

Dans un environnement industriel, le soudeur ou l'inspecteur qualité doit jongler avec une multitude de variables (*vitesse du vent*, *composition chimique*, *paramètres électriques*). Une erreur d'appréciation, comme ignorer un carbone équivalent élevé ($C_{eq} > 0,45$), peut mener à des ruptures catastrophiques. L'absence d'un outil de calcul instantané sur le terrain ralentit la production et augmente les risques de non-conformité.

III.1.2. Objectifs détaillés de l'application

L'objectif de cette application dépasse la simple automatisation de calculs ; il s'agit de concevoir un système expert capable d'accompagner l'utilisateur durant toutes les phases du soudage. Les objectifs se déclinent selon les axes stratégiques suivants :

1. Analyse intégrée des causes de défaillances

Le cœur de l'application est de fournir une explication physique à chaque défaut potentiel. Elle vise à corréler les paramètres de soudage avec les lois de la physique pour identifier l'origine

réelle des problèmes (instabilité de l'arc due au vent, porosités dues à l'humidité, ou fissures dues à une mauvaise cinétique de refroidissement).

2. Maîtrise de la soudabilité métallurgique

L'application a pour objectif de garantir l'intégrité structurale du joint. En calculant le carbone équivalent (C_{eq}) et en prédisant le temps de refroidissement ($\Delta t_{f_{8/5}}$), elle permet de choisir les cycles thermiques (préchauffage, post-chauffage) adaptés pour éviter la formation de phases fragiles comme la martensite.

3. Évaluation de l'impact environnemental

L'objectif est de quantifier l'influence du milieu extérieur sur la qualité du cordon. L'application surveille des seuils critiques, tels que la vitesse du vent (limite de 2 m/s), pour prévenir la rupture du flux laminaire et la contamination atmosphérique du bain de fusion.

4. Optimisation des paramètres opératoires

Le programme vise à assister le soudeur dans le choix optimal du couple Tension/Intensité et du type de gaz de protection. L'objectif est de stabiliser le mode de transfert (court-circuit, globulaire ou spray) afin de minimiser les projections et d'assurer une pénétration conforme aux exigences de l'assemblage.

5. Digitalisation de l'assurance qualité et traçabilité

Enfin, l'application vise à instaurer une rigueur documentaire. Elle permet d'archiver l'historique de chaque pièce et de générer des rapports de diagnostic numériques, facilitant ainsi le suivi de la maintenance et la conformité aux normes internationales (ISO, AWS).

III. 2. Explication du fonctionnement du programme

Cette section détaille l'architecture logique de l'application. Le programme ne se contente pas d'être une interface de saisie, il fonctionne comme un moteur d'inférence qui compare les données réelles du terrain avec les seuils critiques établis par les standards industriels.

III.2.1. Description de l'interface d'accueil

L'interface d'accueil constitue la vitrine de l'application. Elle a été conçue pour présenter le cadre académique et l'identité du projet avant d'accéder aux fonctionnalités de diagnostic.

Comme l'illustre la figure (Insérer le numéro de figure), cette interface se compose des éléments suivants :

L'en-tête Institutionnel : En haut de la page, on retrouve les logos officiels de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen ainsi que les mentions ministérielles. Cela confère à l'application un caractère académique et officiel, ancrant le projet dans le cadre de la Faculté des Sciences.

Les Informations Académiques : Le centre de la page affiche clairement la nature du travail

Type de projet : Projet de Fin d'Études (PFE).

Diplôme : Master en Génie Mécanique.

Spécialité : ASM.

Identification de l'auteur : Le nom de l'étudiant développeur (SALEM ATTIA MOHAMMED) est mis en avant pour la traçabilité du travail.

Le Titre de l'Application : Le nom du logiciel, "Automatic Welding Defect", est inscrit dans un encadré distinct.

L'Élément d'Action (Bouton START) : Un bouton interactif bleu nommé "START" est positionné au centre. Sa fonction est de servir de passerelle vers l'interface de saisie des paramètres. C'est l'unique point d'entrée qui permet de lancer l'exécution des algorithmes de calcul.

Le Bas de Page (Footer) : L'interface mentionne l'année universitaire 2025-2026, situant le projet dans son contexte temporel actuel.

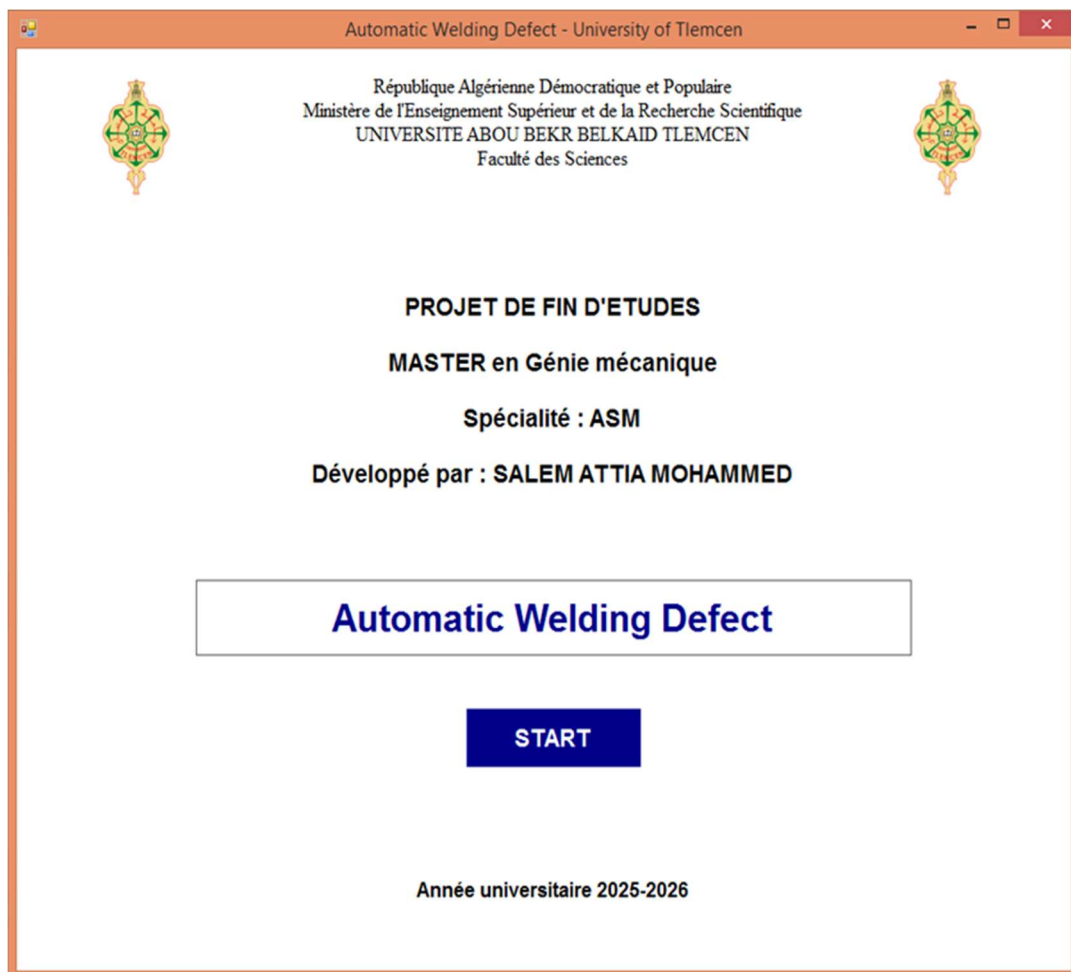


Figure 10 : Interface d'accueil du logiciel "Automatic Welding Defect".

III.2.2. Description de l'interface de saisie des données (Input interface)

Cette interface constitue le cœur interactif de l'application. Elle est conçue de manière modulaire pour permettre à l'utilisateur de renseigner l'ensemble des variables nécessaires au diagnostic.

Figure [11] : Architecture de navigation et segmentation des paramètres d'entrée.

Le Menu latéral de navigation (Sidebar).

À gauche, un menu vertical structure le processus de saisie en neuf (09) catégories distinctes, assurant ainsi une approche systématique du problème :

- 1) Entrées de Base.
- 2) Facteurs Externes.
- 3) Environnement (Vitesse du vent, humidité).
- 4) Métallurgie.
- 5) Caractéristiques.
- 6) Électrode/Fil.
- 7) Localisation.
- 8) Historique.
- 9) Conformité.

III.2.2.1. Entrées de base :

Automatic Welding Defect - University of Tlemcen

1. Entrées de Base

2. Facteurs Externes

3. Environnement

4. Métallurgie

5. Caractéristiques

6. Électrode / Fil

7. Localisation

8. Historique

9. Conformité

CATÉGORIES D'ENTRÉE

1. Entrées de Base - Géométrie

* Le programme traite les pièces de même métal *

Type de Métal:

Épaisseur 1:

Épaisseur 2:

Configuration:

Préparation:

Procédé:

Défaut Suspecté:

Retour

Diagnostic

Figure [12] : Saisie des données géométriques de base (Type de métal et épaisseurs.).

Dans cette première étape de l'application, j'ai conçu une interface dédiée à la définition des paramètres fondamentaux de l'assemblage. Mon objectif est de fixer le cadre physique et matériel avant toute analyse.

Comme le montre l'interface, cette section se compose des éléments suivants :

- **Sélection du matériau (Type de métal)** : J'ai intégré un menu déroulant permettant de choisir parmi les familles de métaux les plus utilisées industriellement (Acier au Carbone, Inox, Aluminium, Fonte). Ce choix est crucial car il définit les propriétés thermo-physiques que le programme utilisera pour les calculs ultérieurs. J'ai ajouté une note précisant que le programme traite des assemblages homogènes (pièces de même nature).
- **Définition des épaisseurs (Épaisseur 1 & 2)** : J'ai prévu deux champs de saisie pour les épaisseurs des pièces à assembler. Ces données sont fondamentales pour mon algorithme de calcul thermique, car elles conditionnent directement la dissipation de la chaleur et le temps de refroidissement ($\Delta t_{8/5}$).
- **Configuration et préparation du joint** : Pour refléter les aspects géométriques, j'ai inclus des options permettant de définir la configuration de l'assemblage (ex: Bout à bout) et

le type de préparation (ex: En V). Ces variables influencent le volume de métal déposé et, par conséquent, l'énergie de soudage nécessaire.

- **Sélection du procédé et diagnostic orienté** : L'utilisateur peut spécifier le procédé utilisé (ici le TIG est sélectionné). Cela permet à mon programme d'ajuster les facteurs d'efficacité thermique.
- **Défaut suspecté** : J'ai ajouté une fonctionnalité innovante sous forme de menu déroulant (ex: Inclusion de Tungstène) qui permet à l'utilisateur d'orienter le diagnostic. Si le procédé est le TIG et que le défaut suspecté est une inclusion de tungstène, mon programme analysera prioritairement les causes liées à l'électrode infusible (affûtage, intensité excessive, etc.).

Pourquoi j'ai structuré cette section ainsi :

L'idée derrière cette interface est de créer un lien direct entre la réalité de l'atelier et la logique de calcul. En forçant la saisie de ces données de base, je m'assure que le diagnostic final ne sera pas une simple estimation, mais une analyse causale précise basée sur la géométrie réelle de la pièce.

III.2.2.2. Facteurs externes :

Automatic Welding Defect - University of Tlemcen

1. Entrées de Base

2. Facteurs Externes

3. Environnement

4. Métallurgie

5. Caractéristiques

6. Électrode / Fil

7. Localisation

8. Historique

9. Conformité

CATÉGORIES D'ENTRÉE

2. Paramètres Opératoires (Électriques Cinétiques)

Angle de soudage: 0 °

Vitesse d'avance: 0 mm/s

Intensité (A): 0 Amp

Tension (V): 0 Volt

Vitesse de soudage: 0 mm/s

Retour Diagnostic

Figure 13 : Configuration des facteurs externes influençant le soudage.

Dans cette deuxième interface, j'ai regroupé les variables dynamiques qui contrôlent l'apport d'énergie et la morphologie du cordon. Ces paramètres sont le moteur physique de l'opération de soudage. J'ai structuré la saisie autour des éléments suivants :

- **L'Angle de soudage (°)** : Ce champ me permet de prendre en compte l'inclinaison de la torche. C'est un facteur déterminant pour la pénétration et la forme du bain de fusion. Un angle incorrect est souvent la cause première de défauts tels que les caniveaux ou un manque de fusion latérale.
- **Vitesse d'avance et vitesse de soudage (mm/s)** : J'ai distingué ces paramètres cinétiques pour une précision maximale. La vitesse de soudage est une variable clé dans mon algorithme pour calculer l'apport calorifique (Heat Input). Une vitesse trop élevée réduit l'énergie linéaire, ce qui peut provoquer des collages, tandis qu'une vitesse trop faible risque d'entraîner un effondrement du bain.
- **Intensité (A) et tension (V)** : Ce sont les deux piliers de l'énergie électrique. L'Intensité contrôle directement la profondeur de pénétration et la fusion du fil. La Tension agit sur la largeur du cordon et la stabilité de l'arc.

En intégrant ces valeurs, mon programme est capable de diagnostiquer si le régime de transfert (Court-circuit, Globulaire ou Spray) est adapté à la configuration de la pièce choisie dans la section précédente.

III.2.2.3. Environnement

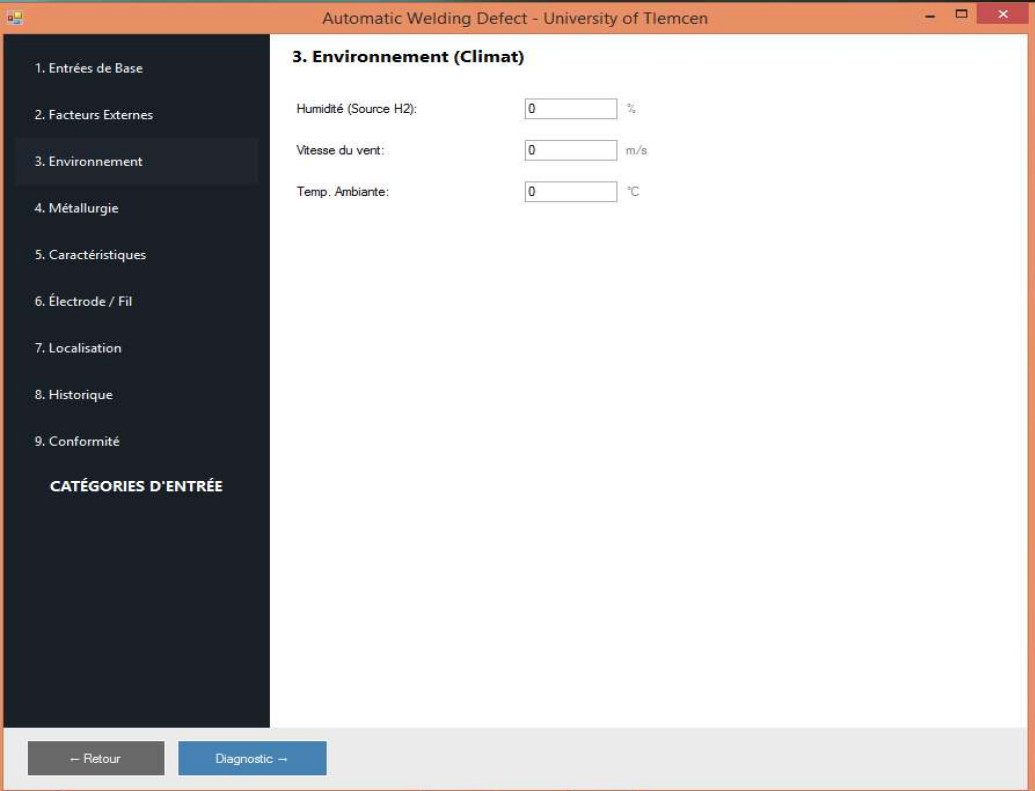


Figure 14 : Paramètres environnementaux et conditions de travail.

Dans cette section, j'ai intégré les paramètres environnementaux qui, bien qu'extérieurs à la machine de soudage, jouent un rôle critique dans la genèse des défauts. Mon objectif est de simuler l'influence du milieu ambiant sur la stabilité du bain de fusion à travers les trois variables suivantes :

Humidité (Source H₂) (%) : J'ai dédié ce champ à la mesure du taux d'humidité relative. Scientifiquement, une forte humidité est une source majeure d'hydrogène diffusible. En intégrant cette donnée, mon programme peut diagnostiquer les risques de porosités ou de fissuration à froid (fragilisation par l'hydrogène), surtout si le métal de base possède un carbone équivalent élevé.

Vitesse du vent (m/s) : C'est un paramètre de contrôle vital pour le procédé MIG/MAG. J'ai configuré l'algorithme pour qu'il compare la valeur saisie au seuil critique de 2 m/s. Si cette limite est franchie, mon application alerte l'utilisateur sur la rupture du flux laminaire du gaz de protection, identifiant ainsi la cause racine d'une éventuelle contamination atmosphérique du cordon.

Température ambiante (°C) : J'ai inclus ce paramètre car il influence directement le taux de refroidissement initial de la pièce. Une température ambiante très basse augmente le gradient thermique, ce qui accélère la trempe métallurgique. Cette donnée permet à mon logiciel d'affiner le calcul du $\Delta_{f_{8/5}}$ et de suggérer, si nécessaire, un préchauffage compensatoire.

III.2.2.4. Analyse métallurgique et calcul du carbone équivalent

Figure 15 : Analyse métallurgique et calcul de l'équivalent carbone (CE).

Cette interface représente le cœur analytique de mon application. Elle me permet de traduire la composition chimique brute de l'acier en un indicateur de soudabilité concret. J'ai structuré cette section pour qu'elle serve de base au diagnostic de la fissuration à froid :

- **Saisie de la Composition Chimique (%)** : J'ai intégré des champs de saisie pour les sept (07) éléments d'alliage les plus influents : le Carbone (C), le Manganèse (Mn), le Chrome (Cr), le Molybdène (Mo), le Vanadium (V), le Nickel (Ni) et le Cuivre (Cu). La précision de cette saisie est capitale, car chaque élément, même à l'état de trace, modifie la trempabilité de l'acier.
- **Le Moteur de Calcul (Bouton Calculer C_{eq})** : J'ai programmé ce bouton pour qu'il exécute instantanément l'algorithme basé sur la formule de l'Institut International de la Soudure (IIW)

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Cette automatisation élimine tout risque d'erreur de calcul manuelle et permet d'obtenir la valeur du Carbone Équivalent (C_{eq}) en temps réel.

- **Interprétation du Statut (En attente...)** : J'ai prévu un indicateur d'état dynamique. Une fois le calcul effectué, le programme ne se contente pas d'afficher un chiffre ; il interprète la valeur du CE. Mon algorithme est configuré pour que si le C_{eq} **dépasse 0,45**, le statut change pour alerter l'utilisateur sur une "**Soudabilité limitée**" ou un "Risque de formation de martensite fragile" dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT).

Exemple : C_{eq} dépasse 0,45

4. Analyse Métallurgique

Carbone (C):	0.18	%	CE: 0,590 Calculer CE <i>Note: Soudabilité difficile!</i> <i>(Préchauffage OBLIGATOIRE)</i>
Manganèse (Mn):	1.2	%	
Chrome (Cr):	0.50	%	
Molybdène (Mo):	0.25	%	
Vanadium (V):	0.05	%	
Nickel (Ni):	0.45	%	
Cuivre (Cu):	0.30	%	

Figure [16] : Evaluation de la soudabilité et recommandation de préchauffage.

L'importance de cette interface réside dans sa capacité à prédire le comportement du métal face au cycle thermique imposé. En reliant la chimie de l'acier au calcul du CE, mon application devient un outil de prévention. Elle permet de décider scientifiquement si un préchauffage est impératif pour ralentir le refroidissement et favoriser l'échappement de l'hydrogène, évitant ainsi la fissuration sous cordon. C'est ici que je fais le pont entre la théorie métallurgique complexe et la pratique simplifiée sur le terrain.

III.2.2.5. Caractéristiques mécaniques (Dureté du matériau)

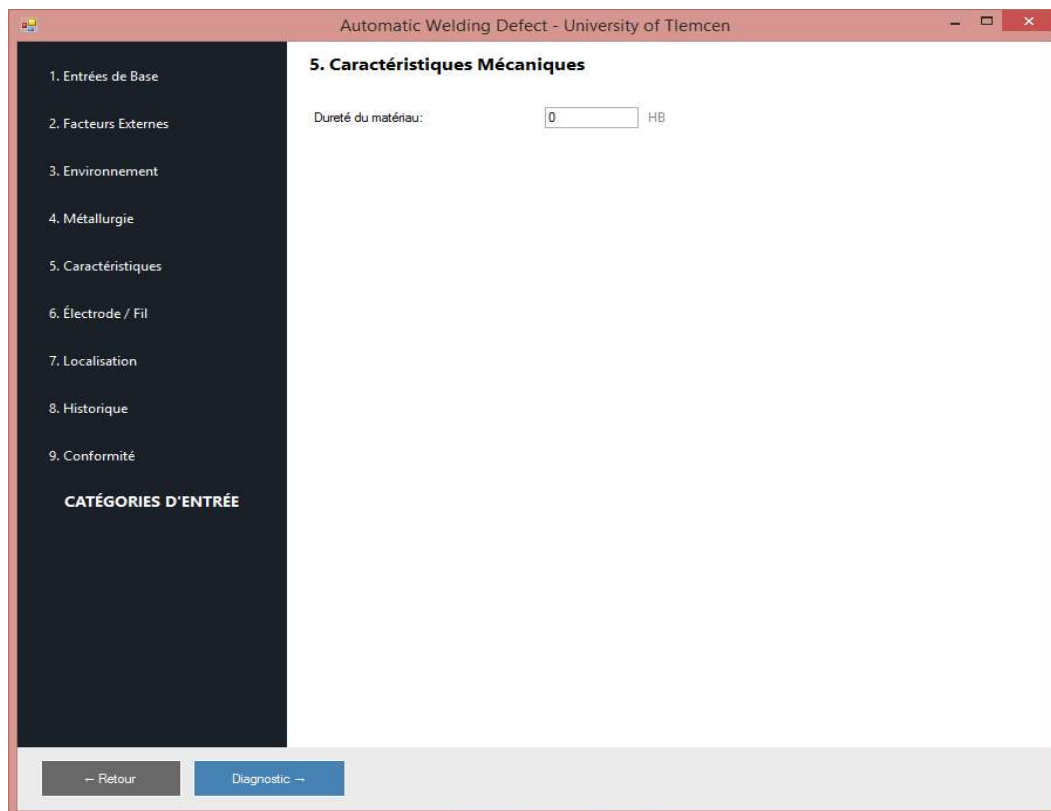


Figure [17] : Spécifications des caractéristiques mécaniques du joint soudé.

Dans cette étape, j'ai jugé essentiel d'intégrer les propriétés mécaniques initiales du métal de base pour affiner mon diagnostic. Cette section se concentre principalement sur la résistance de la matière face aux contraintes de soudage :

- **Saisie de la dureté (HB)** : J'ai prévu un champ pour introduire la valeur de la dureté Brinell (HB) du matériau avant l'opération. La dureté est un indicateur direct de la résistance à la traction et de l'état de traitement thermique de la pièce (ex : acier recuit, trempé ou écroui).

Ma démarche technique et approfondissement :

L'importance de ce paramètre dans mon programme réside dans l'analyse de la fragilité. Scientifiquement, il existe une corrélation étroite entre la dureté finale de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) et le risque de fissuration.

- **En intégrant la dureté initiale, mon algorithme peut :**

Comparer l'état initial et final : Estimer l'augmentation de la dureté après le passage de l'arc en fonction de la vitesse de refroidissement calculée précédemment.

- **Prévenir la fragilisation** : Si la dureté saisie est déjà élevée, le programme renforce ses alertes de sécurité, car une dureté excessive (souvent associée à une structure martensitique) réduit la ductilité et augmente considérablement le risque de rupture brutale sous l'effet des contraintes résiduelles de soudage.

C'est donc un paramètre de "**contrôle de santé**" du métal que j'utilise pour valider la compatibilité du procédé avec l'état métallurgique de la pièce.

III.2.2.6. Électrode et fil (Consommables)

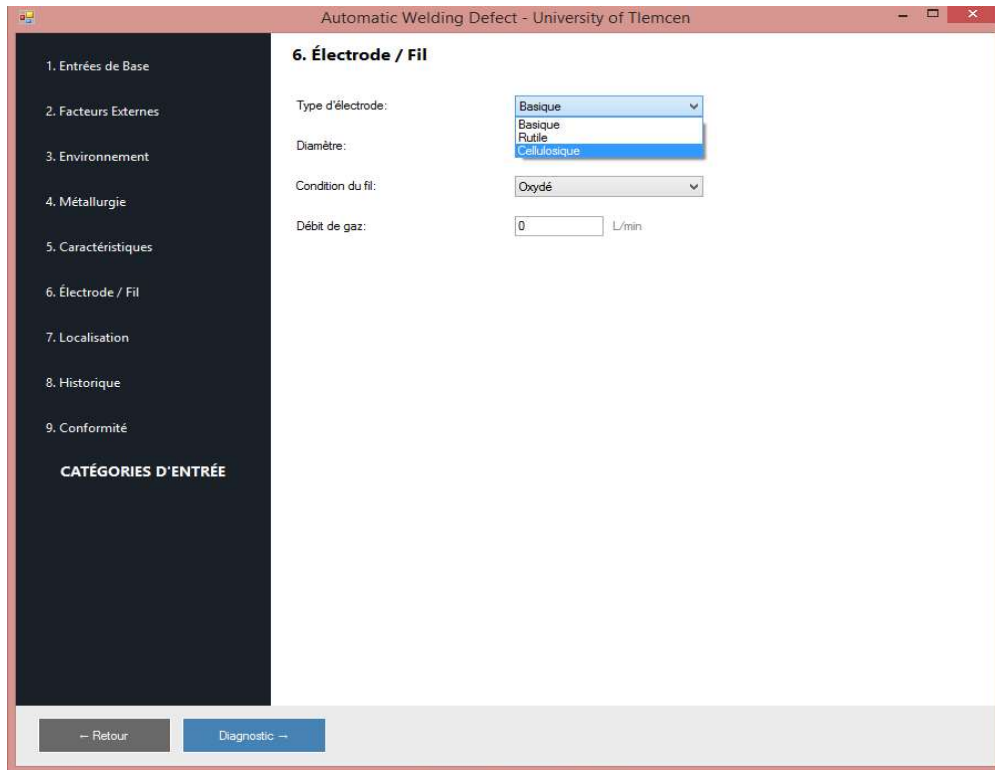


Figure [18] : Interface de sélection et de paramétrage de l'électrode ou du fil d'apport.

Dans cette sixième interface, j'ai voulu donner à l'utilisateur la possibilité de définir les caractéristiques du produit d'apport. La qualité du métal déposé dépend directement de la nature et de l'état de l'électrode ou du fil de soudage. J'ai structuré cette saisie autour de quatre paramètres clés :

- **Type d'électrode** : J'ai intégré un menu déroulant permettant de choisir entre les enrobages les plus courants (Basique, Rutile, Cellulosique). Ce choix est déterminant car chaque type possède des propriétés ionisantes et mécaniques différentes. Par exemple, une électrode basique nécessite une attention particulière pour éviter l'absorption d'humidité.
- **Diamètre (mm)** : Ce champ permet de spécifier la taille du consommable. C'est une donnée que mon programme utilise pour valider la cohérence avec l'intensité (I) saisie précédemment. Une intensité trop élevée pour un petit diamètre provoquerait une surchauffe de l'électrode et des projections excessives.
- **Condition du fil** : C'est une fonctionnalité que j'ai ajoutée pour diagnostiquer les défauts de surface. L'utilisateur peut choisir entre un fil Neuf, Oxydé ou Poussiéreux. Scientifiquement, un fil oxydé introduit de l'oxygène et des impuretés directement dans le bain de fusion. Mon algorithme utilise cette information pour expliquer l'origine des porosités ou des inclusions de laitier.

- **Débit de gaz (L/min)** : Pour les procédés sous protection gazeuse (MIG/MAG/TIG), j'ai inclus ce champ pour contrôler l'efficacité de la protection. Si le débit est trop faible par rapport à la vitesse du vent saisie en Section 3, mon programme alertera immédiatement sur un risque de contamination atmosphérique.

L'originalité de mon approche dans cette section est de traiter le consommable non pas comme un élément parfait, mais comme une source potentielle de défauts. En corrélant la "Condition du fil" avec le "Débit de gaz", mon application est capable de réaliser un diagnostic croisé : elle peut déterminer si une porosité vient d'un manque de protection gazeuse ou d'un salk (fil) mal stocké et oxydé. Cela permet à l'opérateur de corriger la source réelle du problème au lieu de simplement modifier les paramètres électriques.

III.2.2.7. Localisation du défaut

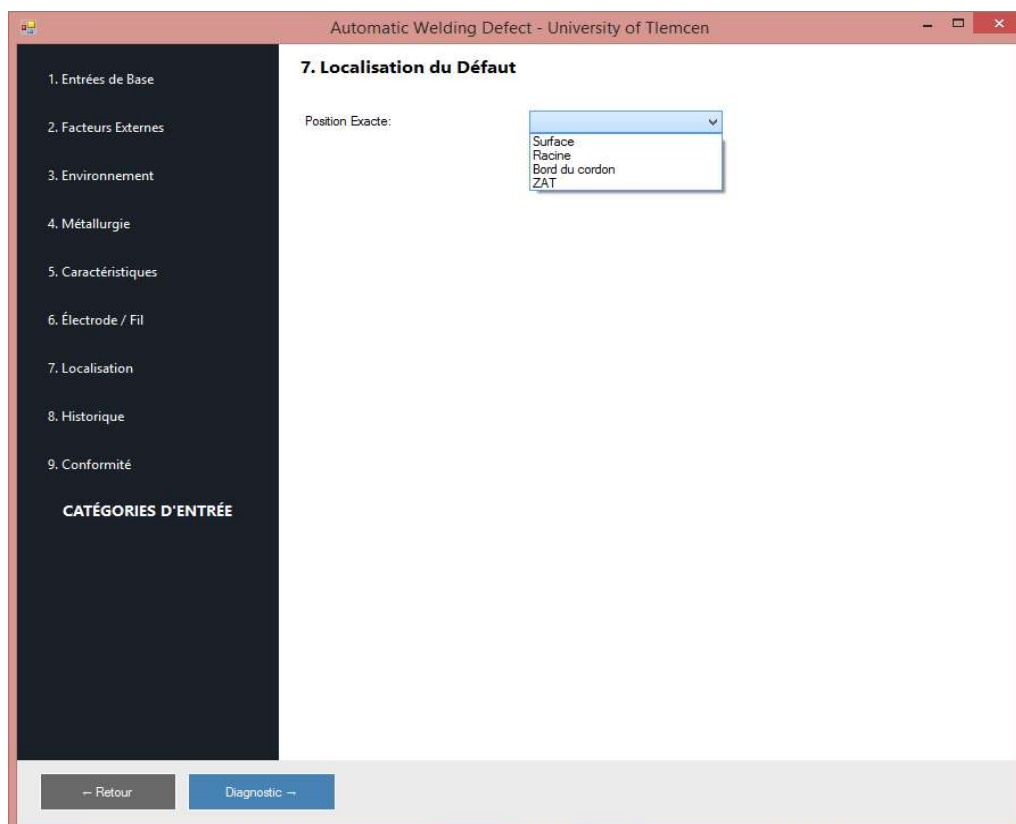


Figure [19] : Menu de sélection de la position exacte du défaut (Surface,Racine,ZAT)

Dans cette septième interface, j'ai voulu donner à l'utilisateur la possibilité de préciser l'emplacement topographique du défaut observé. Cette donnée est fondamentale car la position d'un défaut est souvent révélatrice de sa cause physique. J'ai donc intégré un menu déroulant permettant de choisir parmi les zones critiques suivantes :

- **Surface** : Pour les défauts visibles à l'œil nu comme les projections, les caniveaux ou les porosités débouchantes. Cela oriente mon programme vers des causes liées à la protection gazeuse ou aux paramètres électriques.
- **Racine** : Une localisation cruciale pour détecter les manques de pénétration ou les caniveaux à la racine. Si l'utilisateur choisit cette option, mon algorithme analyse en priorité la préparation du joint (le talon) et l'intensité de soudage de la première passe.

- **Bord du cordon** : Pour cibler les défauts de raccordement ou les morsures.
- **ZAT (Zone Affectée Thermiquement)** : C'est ici que je relie cette interface à l'analyse métallurgique. Si un défaut est localisé dans la ZAT, mon programme suspecte immédiatement un problème lié au cycle thermique $\Delta_{f_{8/5}}$ ou à une dureté excessive entraînant une fissuration à froid.

Ma démarche technique et approfondissement :

L'originalité de mon approche dans cette section réside dans la corrélation spatiale. En ingénierie du soudage, le "Où" explique souvent le "Comment".

Par exemple :

- Si le défaut est en Surface et que la Vitesse du vent saisie est > 2 m/s, mon programme valide avec certitude la cause environnementale.
- Si le défaut est dans la ZAT et que le CE calculé est > 0.45 , le programme confirme une origine métallurgique.
- Cette étape me permet donc d'affiner le diagnostic final en croisant les données géométriques de la pièce avec les observations réelles de l'opérateur, transformant ainsi une simple constatation en une analyse d'expertise technique.

III.2.2.8. Historique de la Pièce

Figure [20] : Paramètres de maintenance : Nombre de réparations et traitements thermiques subis.

Dans cette section, j'ai introduit une dimension temporelle et opérationnelle au diagnostic. L'objectif est de ne pas considérer la pièce comme un élément neuf, mais de tenir compte de son "vécu" technique, ce qui est crucial pour les opérations de maintenance. J'ai structuré cette saisie autour de trois facteurs clés :

- **Nombre de réparations (qté)** : J'ai prévu ce champ car chaque opération de réparation (soudage sur soudage) impose un nouveau cycle thermique à la zone. La multiplication des réparations augmente localement la fragilité et les contraintes résiduelles. Mon programme utilise cette donnée pour alerter sur une saturation thermique de la matière.
- **Traitements Thermiques** : À travers ce menu déroulant, l'utilisateur précise si la pièce a subi des traitements antérieurs (ex: recuit, revenu ou normalisation). Cette information permet à mon algorithme d'ajuster ses prédictions sur la structure métallurgique finale. Un acier déjà traité réagira différemment à l'arc électrique qu'un acier brut de laminage.
- **Âge de la structure (Ans)** : J'ai intégré ce paramètre pour évaluer l'état de fatigue ou de corrosion potentielle du matériau. Une structure ancienne peut présenter des altérations de ses propriétés mécaniques initiales.

Mon intention à travers cette interface est de passer d'un diagnostic "statique" à un diagnostic "dynamique". En ingénierie, l'historique d'une pièce détermine sa résilience.

Par exemple :

- Si une pièce a déjà subi plusieurs réparations, mon programme sera beaucoup plus sévère sur les critères de validation, car le risque de fissuration à chaud ou à froid est multiplié.
- En reliant l'Âge et les Traitements, mon logiciel peut estimer si le matériau de base a conservé sa ductilité d'origine ou s'il est devenu propice à des ruptures fragiles sous l'effet du nouveau cordon.
- C'est une étape de "traçabilité" que j'ai jugée indispensable pour garantir que mon application puisse servir aussi bien dans la construction neuve que dans la réparation de structures existantes.

III.2.2.9. Conformité (Aspect normatif)

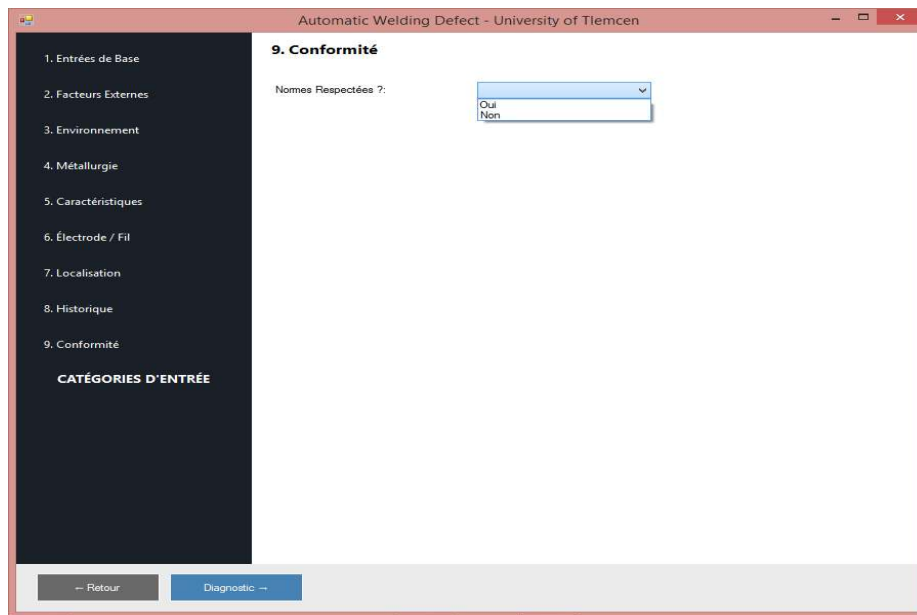


Figure [21] : Vérification de la conformité aux normes.

Cette dernière section de saisie constitue le filtre final de mon application. Elle permet de confronter les pratiques observées sur le terrain aux exigences réglementaires de l'industrie du soudage. J'ai conçu cette interface de manière simplifiée pour valider la rigueur du processus :

Normes Respectées (Oui/Non) : J'ai intégré ce champ pour forcer l'utilisateur à déclarer si l'opération de soudage suit un Descriptif de Mode Opératoire de Soudage (DMOS) ou une norme spécifique. C'est un paramètre binaire qui influence l'interprétation finale du diagnostic.

L'objectif de cette section est de clore la phase d'acquisition des données par une validation de conformité.

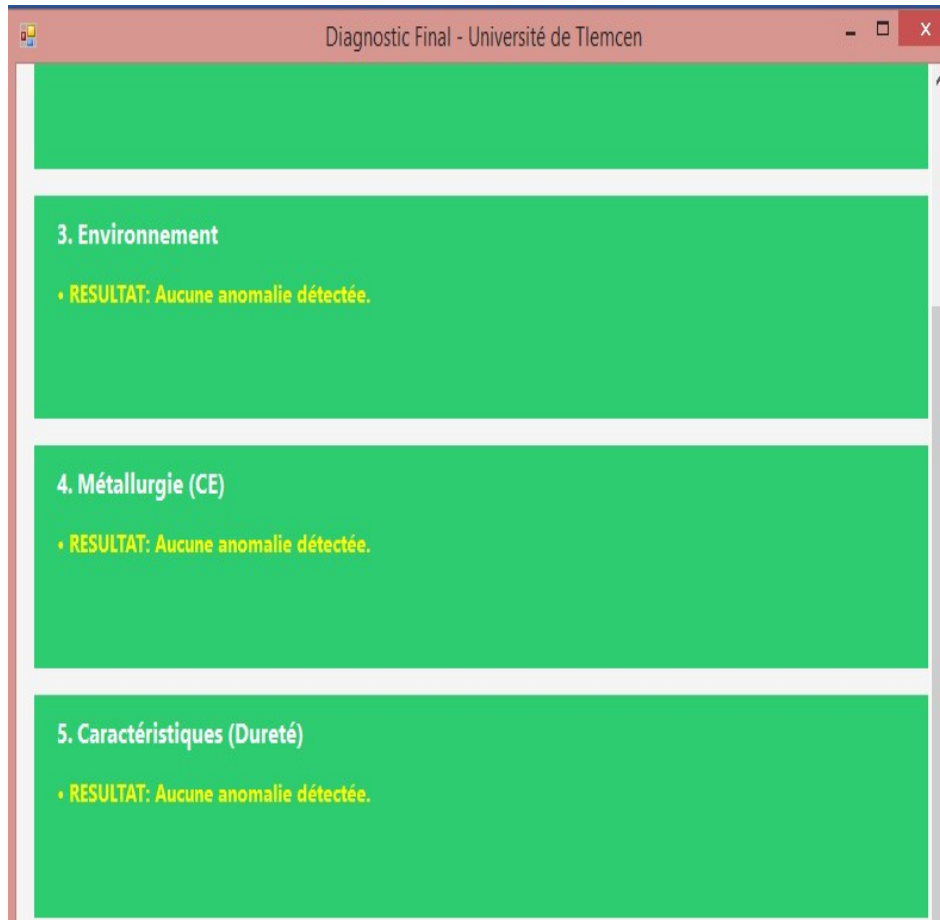
Mon approche repose sur la logique suivante :

- **Responsabilisation de l'utilisateur** : En demandant si les normes sont respectées, le programme peut pondérer ses conclusions. Un défaut survenant alors que les normes sont déclarées "respectées" indique une cause racine plus subtile (métallurgique ou environnementale imprévue).
- **Base du Rapport Final** : Cette donnée est extraite pour figurer dans le rapport de diagnostic généré par l'application, assurant ainsi une traçabilité complète pour les services de contrôle qualité.

Avec cette neuvième section, j'achève la collecte de tous les paramètres (géométriques, opératoires, environnementaux, métallurgiques et normatifs). Mon programme dispose désormais de toutes les variables nécessaires pour lancer l'algorithme de Diagnostic Final et proposer les solutions correctives.

III.2.3. Description de l'interface de diagnostic final

III.2.3.1 Introduction



Après avoir validé l'ensemble des paramètres dans les sections précédentes, j'ai conçu cette interface comme un tableau de bord de synthèse. Son rôle est de regrouper les conclusions de l'algorithme pour chaque catégorie traitée. Comme le montre la figure (Insérer le numéro de la dernière image), l'interface se présente sous forme de blocs modulaires clairs :

Structure de l'affichage : J'ai organisé les résultats selon la même hiérarchie que la saisie (Entrées de Base, Facteurs Externes, Environnement, Métallurgie, Caractéristiques). Cela permet à l'utilisateur de vérifier rapidement quel domaine est à l'origine d'un éventuel problème.

Le Code Couleur de Sécurité : Pour rendre le diagnostic intuitif, j'ai intégré un indicateur visuel basé sur la couleur :

Couleur Verte : Elle indique que les paramètres saisis sont conformes aux standards de soudage. Le message "RESULTAT : Aucune anomalie détectée" confirme que, selon les modèles mathématiques du programme, le risque de défaut est minimal.

Couleur Rouge/Orange (en cas d'erreur) : Si un seuil critique est franchi (ex: Vent > 2 m/s), le bloc correspondant change de couleur pour attirer l'attention de l'opérateur et affiche la nature du risque.

L'Analyse Segmentée :

Bloc 1 & 2 (Base & Facteurs) : Confirment la cohérence entre le procédé choisi et la préparation de la pièce.

Bloc 3 (Environnement) : Valide si les conditions climatiques permettent une protection gazeuse stable.

Bloc 4 (Métallurgie) : Affiche la conclusion basée sur le calcul du CE. C'est ici que le programme confirme si l'acier est apte au soudage sans précautions particulières.

Bloc 5 (Dureté) : Vérifie si la dureté du matériau ne présente pas un danger de fragilité excessive.

L'originalité de cette interface est qu'elle ne se contente pas de donner un résultat global, mais elle isole les responsabilités. Si une soudure échoue, mon programme permet de savoir si c'est la faute de l'environnement (vent), de la machine (paramètres électriques) ou du métal lui-même (chimie). C'est un véritable outil d'aide à la décision pour l'inspecteur en soudage.

III.3.3.2 Exemples d'application

Afin de valider le bon fonctionnement de l'algorithme de diagnostic, j'ai soumis le programme à plusieurs scénarios réels.

III.2.3.2.1 Exemple 1 : Diagnostic d'une Soudure sans Défaut (État Nominal)

Dans ce premier scénario, j'ai introduit des paramètres correspondant à une procédure de soudage standard et optimisée.

A. Les Données d'Entrée (Inputs) :

- Matériau : Acier à faible teneur en carbone ($C = 0.15\%$).
- Épaisseur : 10 mm.
- Paramètres Électriques : $I = 120\text{ A}$, $U = 22\text{ V}$ (Valeurs modérées).
- Environnement : Vitesse du vent = 0.5 m/s , Humidité = 30% .
- Métallurgie : Valeur de CE calculée ≈ 0.32 (inférieure au seuil critique de 0.45).

B. Analyse de l'Interface de Diagnostic :

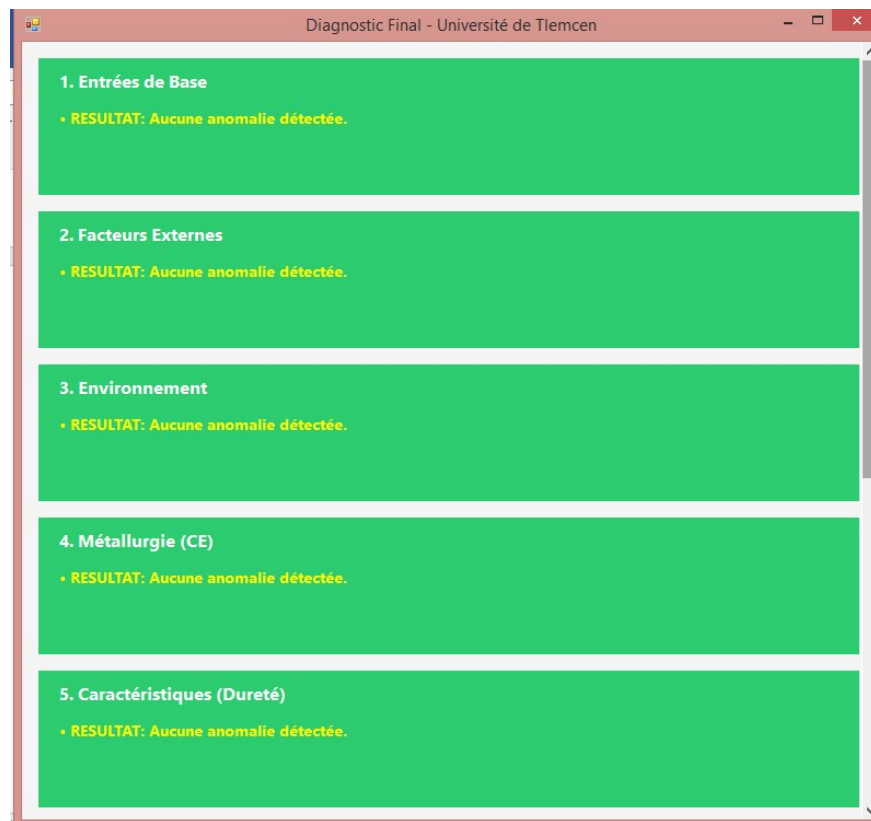


Figure [22] : Validation d'une Soudure sans Défaut

Comme illustré sur l'image capturée de mon logiciel, nous constatons que tous les blocs de diagnostic s'affichent en Vert.

Validation des Entrées de Base : L'épaisseur et la géométrie sont compatibles avec l'énergie de soudage.

Validation de l'Environnement : La vitesse du vent (0.5 m/s) étant très inférieure au seuil de 2 m/s, la protection gazeuse est déclarée stable.

Validation Métallurgique : Le carbone équivalent étant faible, le programme conclut à une excellente soudabilité sans risque de fissuration.

Conclusion du Programme : L'affichage du message "RESULTAT : Aucune anomalie détectée" confirme que la procédure est sûre.

III.2.3.2.2 Exemple 2 : Analyse des causes des "Porosités"

Dans ce troisième cas d'étude, l'utilisateur a observé la présence de porosités dans son cordon de soudure. Il utilise alors le logiciel pour remonter à la source de ce défaut en saisissant les paramètres réels de son environnement de travail.

A. Saisie des données de terrain :

L'opérateur introduit les conditions enregistrées lors de l'opération :

- Défaut suspecté : Porosités.
- Matériau : Acier au Carbone (A ou Carbone).
- Épaisseurs (EP1 & EP2) : 25 mm
- Configuration : Assemblage en angle, sans préparation (Sans).
- Procédé : MIG/MAG.
- Conditions climatiques : Une humidité très élevée ($H = 80\%$) et une vitesse de vent excessive ($V = 25 \text{ m/s}$).

B. Analyse du Diagnostic et Solutions :

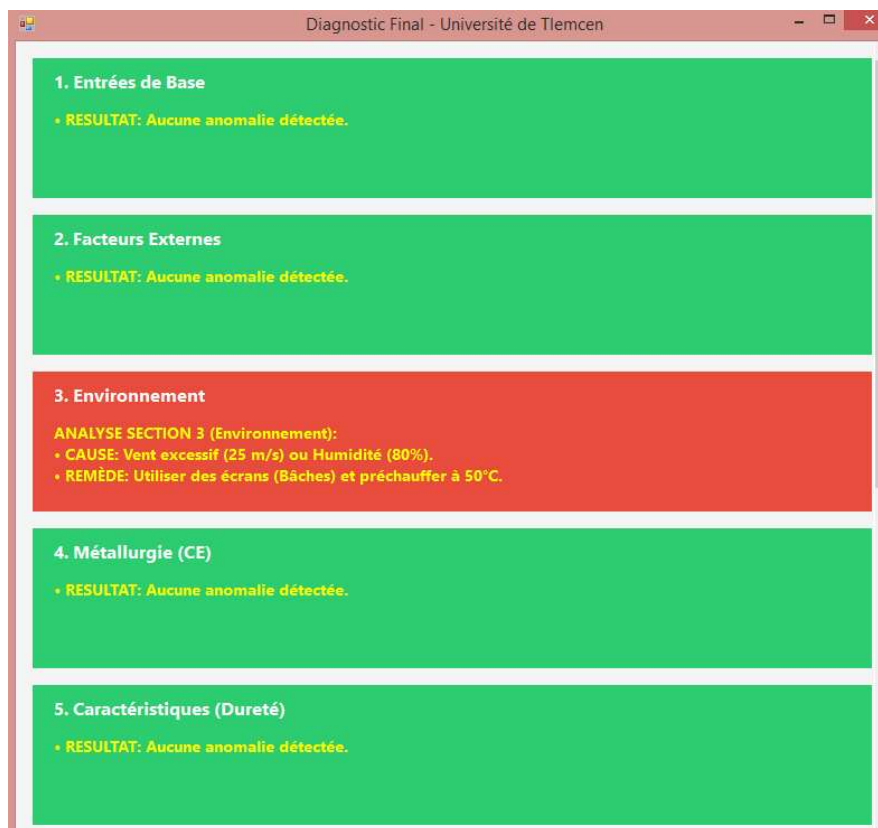


Figure [23] : Identification des Causes de Porosités.

Après traitement, le programme valide les sections 1, 2, 4 et 5, 6, 7,8,9 en vert (conformes), mais marque la Section 3 (Environnement) en Rouge :

Identification de la Cause : Le logiciel identifie que le vent excessif (25 m/s) ou l'humidité (80\%) sont les causes directes de l'apparition des porosités. Scientifiquement, un tel vent rompt

la protection gazeuse du procédé MIG/MAG, tandis que l'humidité introduit de l'hydrogène dans le bain de fusion.

Remède Technique : Le programme préconise l'utilisation d'écrans de protection (bâches) contre le vent et un préchauffage à 50°C pour éliminer l'humidité résiduelle.

Remarque Importante sur le Processus de Diagnostic :

Il est fondamental de noter que dans cet exemple, j'ai mis en évidence les paramètres spécifiques qui ont déclenché l'alerte (Vent et Humidité). Cependant, pour que le logiciel puisse isoler ces causes avec précision, l'utilisateur est tenu d'introduire la totalité des données demandées dans les 9 sections de l'application.

C'est précisément cette saisie exhaustive qui permet à l'algorithme de procéder par élimination :

en vérifiant que les paramètres électriques, mécaniques et métallurgiques sont corrects, le programme peut confirmer avec certitude que ce sont les facteurs environnementaux (Section 3) qui sont les seuls responsables du défaut constaté.

III.2.3.2.3. Exemple 3 : Analyse des causes du "Caniveau"

Dans ce quatrième cas d'étude, l'opérateur constate l'apparition d'un caniveau (une gorge le long du cordon de soudure). Ce test est particulièrement intéressant car il montre comment le logiciel gère plusieurs erreurs simultanées dans différentes sections.

A. Saisie des données de terrain :

L'utilisateur a introduit les paramètres suivants dans les différentes rubriques :

- Défaut suspecté : Caniveaux.
- Matériau : Acier au Carbone.
- (Épaisseur) : 50 mm.
- Facteurs Externes (Vitesse) : $V_{avance} = 15 \text{ mm/s}$.
- Électrode / Fil (Débit gaz) : 25 L/min.

B. Diagnostic Multi-sectionnel (Images 1000024570 & 1000024571) :



Figure [24] : Analyse Multifactorielle du défaut « Caniveau »



Figure [25] : Analyse Multifactorielle du défaut « Caniveau »

Ici, le programme a identifié des anomalies dans trois sections distinctes, prouvant que le défaut n'a pas une cause unique :

Section 1 (Entrées de Base) : Le logiciel signale un risque critique de caniveau sur une forte épaisseur (>50 mm) à cause d'une concentration thermique excessive.

Section 2 (Facteurs Externes) : Il détecte que la vitesse de soudage (15 mm/s) est trop élevée pour ce volume de métal. Remède : Diminuer la vitesse à moins de 12 mm/s.

Section 6 (Électrode / Fil) : Le programme identifie que le débit de gaz (25 L/min) est trop puissant, ce qui crée des turbulences dans le bain de fusion. Remède : Régler le débit entre 12 et 16 L/min.

Remarque Importante

Comme le démontre cet exemple, le logiciel n'affiche que les paramètres en rouge (Vitesse, Débit de gaz, Épaisseur) car ce sont eux qui provoquent le "Caniveau". Cependant, pour arriver à ce résultat précis et éliminer d'autres causes possibles (comme la chimie du métal ou l'humidité), l'utilisateur doit obligatoirement introduire toutes les données demandées par l'application.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la conception et le développement d'une application informatique d'aide au diagnostic des défauts de soudage, intitulée "Automatic Welding Defect". L'objectif principal était de combler le fossé entre la complexité théorique de la métallurgie du soudage et les besoins pragmatiques de rapidité et de précision sur le terrain.

Tout au long de ce projet, nous avons suivi une démarche structurée qui nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Maîtrise des paramètres multidisciplinaires : Le soudage n'est pas seulement un arc électrique ; c'est une interaction complexe entre la géométrie, la chimie des matériaux, les paramètres opératoires et les conditions environnementales. Notre logiciel a réussi à intégrer ces neuf sections critiques pour offrir une analyse globale.

Intelligence du diagnostic par élimination : Grâce à l'algorithme que nous avons développé, le programme ne se contente pas d'identifier un défaut, mais il en recherche la "cause racine". En obligeant l'utilisateur à renseigner l'ensemble des données, le logiciel procède par filtrage intelligent pour isoler uniquement les facteurs non conformes (vent excessif, vitesse trop élevée, ou carbone équivalent critique).

Optimisation de la prise de décision : Les tests effectués (cas de la fissuration à chaud, porosités, et caniveaux) ont démontré que l'application fournit des solutions correctives immédiates et précises. Cela réduit considérablement le temps d'expertise et minimise les coûts liés aux réparations et aux arrêts de production.

Apport pédagogique et industriel : Cet outil constitue à la fois un support pédagogique pour les étudiants en soudage et un assistant technique pour les inspecteurs qualité. Il permet de digitaliser le savoir-faire métallurgique pour le rendre accessible et exploitable en temps réel.

En somme, "Automatic Welding Defect" n'est pas seulement un programme informatique, c'est une tentative réussie de modélisation de l'expertise humaine au service de la sécurité et de la qualité des constructions soudées.

Webographie et Bibliographie

- [1] www.promeca.com
 - [2] www.promeca.com
 - [3] Sindo Kou, "Welding Metallurgy", Second Edition, John Wiley & Sons, 2003.
 - [4] J. F. Lancaster, "The Physics of Welding", 2nd Edition, Pergamon Press, 1986.
 - [5] J. F. Lancaster, "The Physics of Welding", 2nd Edition, Pergamon Press, 1986
 - [6] Sindo Kou, "Welding Metallurgy" 2nd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003
 - [7] Sindo Kou, "Welding Metallurgy" 2nd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003
 - [8] www.Soudeurs.com
 - [9] "Modern Welding Technology" Howard B. Cary.
 - [10] <https://bil-ibs.be/fr/publicatie/developpements-recents-dans-le-domaine-du-soudage-migmag-et-ti>
 - [11] H. B. Cary and S. C. Helzer, "Modern Welding Technology", 6th Edition, Pearson/Prentice Hall, 2005.
 - [12] H. B. Cary and S. C. Helzer, "Modern Welding Technology", 6th Edition, Pearson/Prentice Hall, 2005.
 - [13] S. Kou, "Welding Metallurgy", 2nd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
 - [14] <https://www.wilhelmsen.com/globalassets/ships-service/welding/documents/wilhelmsen-ships-service---unit-or-welding-handbook.pdf>
 - [15] www.rocdacier.com
 - [16] C. Hazard, "Mémotech : Soudage et constructions soudées", Éditions Casteilla, Paris, 2011.
 - [17] L. Jeffus, "Welding: Principles and Applications", 8th Edition, Cengage Learning, Boston, USA, 2016.
 - [18] www.rocdacier.com/tension-de-soudage-polarite-rendement
 - [19] Lincoln Electric, "GMAW Welding Guide: Procedures and Techniques for Gas Metal Arc Welding", www.lincolnelectric.com
 - [20] Techniques de l'Ingénieur : Énergie linéique et cycle thermique en soudage www.techniques-ingenieur.fr
- Oerlikon (Groupe Air Liquide) : Influence de la vitesse de soudage sur la pénétration
Et l'apport thermique www.oerlikon.com/fr
- [21] Fronius International : importance de la partie terminale libre du fil (Stick-out) en soudage MIG/MAG www.fronius.com
- Lincoln Electric France : Comprendre l'effet Joule et le Stick-out dans les procédés semi-automatiques
www.lincolnelectric.com/fr-fr
- [22] THE WELDING INSTITUTE (TWI) <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge>

- [23] IS (Institut de Soudure) : Les positions de soudage selon ISO 6947 et la gestion du bain de fusion www.isgroupe.com
- [24] TWI (The Welding Institute) <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/shielding-gases-for-arc-welding-038>
- [25] www.axxair.com
- [26] Modélisation de la fissuration à froid dans un acier ferritique de type 16MND5 <https://pastel.hal.science/tel-01144540v1/file/Manuscrit.pdf>
- [27] GAUCHRE, Pierre. Le soudage à l'arc sous protection gazeuse (MIG-MAG-TIG). Manuel technique . Paris : Éditions du Centre Technique du Soudage, 2012
- [28] <https://www.soudeurs.com>
- [29] Source : LABACI, S., "Étude du problème inverse : Cas de contact thermique périodique : Application au siège-soupape", Mémoire de Master, Spécialité : Énergétique et Environnement, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2016.
- [30] Source : A New Method for Weld Dilution Calculation through Chemical Composition Analysis <https://pdfs.semanticscholar.org/368a/f08b98806b7e4b015cbcf6e6cbd5c8430d4f.pdf>
- [31]
- [32] ROCDACIER, Métallurgie du soudage : Dilution et Zone Affectée Thermiquement (ZAT) www.rocdacier.com
- [33] www.rocdacier.com
- [34] AIR LIQUIDE WELDING, Guide de soudabilité des aciers et calcul du Carbone Équivalent Document technique Oerlikon, www.oerlikon.com
- [35] ROCDACIER, Préparation des bords et types de joints en soudage www.rocdacier.com
 SOUDEURS.COM, pratique : Le jeu à la racine et la conception des
 Chanfreins www.soudeurs.com
- [36] AIR LIQUIDE WELDING (Oerlikon), Propriétés mécaniques et essais sur joints
 Soudés, Guide technique de soudabilité.
 TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR, Essais mécaniques des soudures : Traction,
 Pliage et Résilience www.techniques-ingenieur.fr
- [37] ESAB Group, "Repair and Maintenance Welding Handbook: Traceability, Surface Degradation, and Pre-welding Inspections", Technical Resources, Sweden, 2024.