

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE.

UNIVERSITE- AIN TEMOUCHENT –BELHADJ BOUCHAIB

FACULTE DES SCIENCE ET DE TECHNOLOGIE

Département de Génie mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

EN : DOMAINE SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIER : GENIE MECANIQUE

SPECIELITE : CONSTRUCTION MECANIQUE

Thème

Analyse expérimentale et modélisation thermomécaniques du soudage par friction de plaque de polymère.

Présenté Par :

1. ZAOUI Ahlem Ferdaous
2. SIDI YAKOUB Marwa

Nom & Prénom	Grade & Etablissement	EN Qualité de
MOHAMED.SERIER	Pr. UBB AIN TEMOCHENT	Encadreur
NEHARI Tayeb	Pr. UBB AIN TEMOCHENT	Juré
SALLAH Hichem	Dr. UBB AIN TEMOCHENT	Juré

Année Universitaire 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Avant d'entrer dans le vif de ce travail, il nous semble essentiel de commencer par exprimer notre reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions d'abord Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, la Patience, le courage et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Sans Sa volonté, rien n'aurait été possible.

À ceux qui nous ont beaucoup appris au cours des 5 ans de notre formation, en partageant leur savoir, leur expérience et leur bienveillance, nous exprimons notre profonde gratitude. Nous pensons particulièrement à nos professeurs, à l'équipe pédagogique, à nos collègues, ainsi qu'à tout le personnel administratif de notre université.

Nous adressons nos remerciements chaleureux à notre directeur de Recherche Monsieur SERIER MOHAMED, pour sa disponibilité, sa rigueur, ses conseils avisés et sa confiance continue, qui ont été pour nous un guide précieux tout au long de cette étude.

Nos pensées reconnaissantes vont également à nos familles, et plus spécialement à nos parents, pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leurs encouragements constants depuis nos premiers pas dans le monde de l'apprentissage.

Nous remercions également l'équipe de l'atelier de mécanique pour leur appui technique et leur accompagnement pratique durant les phases expérimentales de notre travail.

Nos remerciements s'adressent à l'ensemble du corps enseignant de l'université BELHADJ BOUCHAIB AIN TÉMOUCHENT en particulier du département Département de Génie Mécanique, pour l'encadrement et la formation de qualité qu'ils nous ont dispensés, ainsi qu'à toute la Promotion 2025, avec qui nous avons partagé ce parcours.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à l'ensemble du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives. À toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à notre réussite

Trouvez en ces mots notre profonde gratitude.

Dédicace

Ce mémoire est bien plus qu'un travail académique ; il est le fruit d'un parcours, de sacrifices et de soutiens précieux. A ceux qui ont contribué à cette aventure, je dédie ces lignes avec émotion.

A mon père ZAOUI Mohamed Saïd;

Pour sa force, ses conseils et sa confiance, qui m'ont toujours guidé.

A ma mère ;

Pour son amour inestimable, ses prières et son soutien constant dans chaque étape de ma vie.

A ma grande sœur Kaoutar ;

Pour son affection, ses encouragements et sa présence rassurante à mes côtés.

A ma petite sœur Hiba ;

Pour sa joie de vivre, sa douceur et l'inspiration qu'elle m'apporte au quotidien.

À mes copines chères Youssra et Manel,

Pour leurs soutiens, leurs présences et leurs complicités qui m'ont aidée à avancer.

A mes amis ;

Pour leurs amitiés sincères, leurs écoutes et leurs soutiens tout au long de ce parcours.

A mon binôme Marwa ;

Pour son sérieux, sa patience et l'esprit d'équipe qui a rendu ce travail possible.

Merci à tous

Zaoui Ahlem Ferdaous

Dédicace

*À tous ceux qui sont chers, ceux à qui je dois mon succès :
À notre « Seigneur, Dieu tout puissant », merci dieu de m'avoir donné la vie, la foi,
les prières exaucées pour m'y arriver.*

À celui qui m'a dit un jour que je suis la prunelle de ses yeux, et qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui car il est mon Père, celui dans les yeux duquel je vois la fierté de moi, mon modèle de respect et d'amour d'un père, de la compréhension et de la générosité. Grâce à toi j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureux et fier. Mon ange gardien ton amour et ta présence dans ma vie et le fait d'être mon père continueront d'éclairer mon chemin.

À celle dont ses paroles m'accompagnent depuis que j'étais petite, la première Femme Forte, courageuse qui a souffert sans nous laisser souffrir, celle qui m'a appris à être une fille forte et qui cherche toujours à achever ses objectifs à tout prix ; celle qui m'a encouragé à poursuivre mes rêves même les obstacles semblaient insurmontables. A mon paradis a la prunelle de mes yeux ma moitié maman

"À ma sœur Wafa et mes chères frères Aymen et Riad témoins des étapes de ma vie, dans ma joie et ma tristesse, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral. "

*"À ma chère cousine Ines, ton soutien sans faille et ton esprit libre ont toujours éclairé mon chemin. En écrivant ces lignes, je te remercie de l'énergie positive que tu apportes dans mon existence. Ta présence dans mon cœur est un trésor précieux.
Merci, chère Ines, pour ton amitié inépuisable."*

À mes amies Bouchra, Boudour, Yousra et Manel, vous êtes plus que des amies : vous êtes des sœurs de cœur. Merci pour les éclats de rire, les mots d'encouragement, les silences compris. Ce parcours aurait été bien plus fade sans vous.

Et à mon binôme Ahlem, avec qui j'ai tout partagé : les doutes, les efforts, les réussites, les longues heures de travail et les petits instants de complicité. Ta patience, ton soutien constant et ton cœur immense ont été une bénédiction. Merci d'avoir été là, vraiment.

À toute personne formidable que je connaisse, Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux allégués, et le fruit de votre soutien infaillible

Enfin je dédie ce travail à moi-même, c'est le temps D'y être !

Sidi yakoub marwa

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude du soudage par friction-malaxage (FSW), une technique innovante d'assemblage en phase solide, appliquée au polyéthylène haute densité (PEHD), un polymère thermoplastique couramment utilisé dans l'industrie. Contrairement aux procédés de soudage traditionnels impliquant la fusion des matériaux, le FSW permet la réalisation de joints solides par l'action mécanique d'un outil rotatif, générant de la chaleur par frottement sans atteindre la température de fusion. Cette méthode limite ainsi l'apparition de défauts tels que la porosité ou les déformations thermiques.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'influence de certains paramètres opératoires — la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et l'angle d'inclinaison de l'outil — sur la qualité du joint soudé. Une démarche expérimentale a été mise en place, complétée par une modélisation statistique fondée sur la méthode des plans d'expériences (DOE), afin d'optimiser les conditions de soudage.

Les résultats obtenus confirment la pertinence et l'efficacité du procédé FSW pour l'assemblage du PEHD, en offrant des joints de bonne qualité mécanique.

Cette étude ouvre ainsi la voie à l'intégration de cette technologie dans des applications industrielles exigeant à la fois performance, fiabilité et durabilité des assemblages.

Par ailleurs, une approche basée sur l'intelligence artificielle (IA) a été utilisée pour analyser et modéliser les résultats expérimentaux. Cette méthode a permis de prédire efficacement la qualité des joints soudés en fonction des paramètres de soudage et d'optimiser les conditions du procédé.

Mots clés : soudage par friction malaxage (FSW), polyéthylène haute densité (PEHD), paramètre opératoires, qualité de joint, plans d'expérience (MPE), assemblage en phase solide, intelligence artificielle (IA).

Abstract

This thesis focuses on the study of Friction Stir Welding (FSW), an innovative solid-state joining technique, applied here to high-density polyethylene (PEHD), a widely used thermoplastic polymer in the industrial sector. Unlike conventional welding processes that rely on the melting of materials, FSW produces solid joints through the frictional heat generated by a rotating tool, thus avoiding common defects such as porosity and thermal distortion.

The main objective of this work is to investigate the influence of key process parameters — tool rotation speed, feed rate, and tilt angle — on the weld quality. An experimental approach was adopted, supported by a statistical modeling framework based on the Design of Experiments (DOE) methodology, with the aim of optimizing the welding conditions.

The obtained results demonstrate the effectiveness of FSW in welding PEHD, producing joints with good mechanical performance. This study highlights the potential of this process for integration into industrial applications requiring high reliability, strength, and durability of welded assemblies.

In addition, an artificial intelligence (AI)-based approach was used to analyze and model the experimental results. This method enabled us to effectively predict the quality of welded joints as a function of welding parameters, and to optimize process conditions.

Keywords: friction stir welding (FSW), high-density polyethylene (PEHD), operating parameters, joint quality, design of experiments (DOE), solid-phase assembly, artificial intelligence (AI).

ملخص

تتناول هذه الأطروحة دراسة اللحام بالتقليب الاحتكاكي وهي تقنية مبتكرة للربط في المرحلة الصلبة مطبقة على البولي إيثيلين عالي الكثافة وهو بوليمر لدن بالحرارة شائع الاستخدام في الصناعة. وعلى عكس عمليات اللحام التقليدية التي تنطوي على ذوبان المواد، تتيح تقنية اللحام بالتقليب الاحتكاكي إنتاج وصلات صلبة عن طريق الحركة الميكانيكية لأداة دوارة، مما يولد حرارة من خلال الاحتكاك دون الوصول إلى درجة حرارة الانصهار. وبالتالي تحد هذه الطريقة من ظهور العيوب مثل المسامية أو التشوه الحراري.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تقييم تأثير بعض معلمات التشغيل - سرعة الدوران ومعدل التغذية وزاوية ميل الأداة - على جودة الوصلة الملحومة. تم تنفيذ نهج تجريبي، مدعومًا بنمذجة إحصائية تستند إلى طريقة تصميم التجارب من أجل تحسين ظروف اللحام.

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها على أهمية وفعالية عملية لحام الخرسانة المفطحة لربط البولي إيثيلين عالي الكثافة مما يوفر وصلات ذات جودة ميكانيكية جيدة.

تمهد هذه الدراسة الطريق لدمج هذه التقنية في التطبيقات الصناعية التي تتطلب أداءً وموثوقية ومثانة للتركيبات.

بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام نهج الذكاء الاصطناعي لتحليل و نمذجة النتائج التجريبية. استخدمت هذه الطريقة للتنبؤ بفعالية بجودة الوصلات الملحومة كدالة لمعايير اللحام و لتحسين ظروف العملية .

الكلمات الرئيسية: اللحام بالتقليب الاحتكاكي- بولي إيثيلين عالي الكثافة- معلمات التشغيل- جودة الوصلة- تصميمات تجريبية- تجميع المرحلة الصلبة-الذكاء الاصطناعي.

Liste de figure

Chapitre I

Figure I. 1:soudage au chalumeau.....	6
Figure I. 2:Soudage MMA.....	6
Figure I. 3:Soudage TIG.	6
Figure I. 4: Soudage MIG/MAG.	7
Figure I. 5:Soudage par résistance.	7
Figure I. 6: Soudage par friction rotative (RFW).....	8
Figure I. 7:Soudage au fer.	8
Figure I. 8:Soudage par friction malaxage (FSW).	9
Figure I. 9:Principe de FSW.	11
Figure I. 10:Configurations de joints pour le soudage par friction malaxage : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle.	12
Figure I. 11:Polyéthylène haute densité.....	18

Chapitre II

Figure II. 1:Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs	25
Figure II. 2:L'espace expérimental	25
Figure II. 3:point dans l'espace expérimental.....	26
Figure II. 4:La surface de réponse.....	29
Figure II. 5:L'optimisation de la réponse	30
Figure II. 6:Plans factoriels complets 2^2 et 2^3	32

Chapitre III

Figure III. 1:Géométries d'épaulement	43
Figure III. 2:Expérience.....	44
Figure III. 3:Schéma thermique des deux modèles (expérimental et théorique)	49
Figure III. 4:effet des facteurs principaux	50
Figure III. 5:effet des interactions	51
<i>Figure III. 6: iso courbe des figures 3D</i>	51
Figure III. 7:intervalle de confiance des facteurs principaux	52
Figure III. 8:régression des prédit par ai.....	53
Figure III. 9:effets des paramètre principaux sur la variation de température au cours de l'opération de soudage.....	54

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1:Domaine d'utilisation des polymères	17
Tableau I. 2:Domaine d'application de PEHD	21

Chapitre II

Tableau II. 1: Matrice d'un plan 2^2	33
Tableau II. 2:Matrice d'un plan 2^3	33
Tableau II. 3:matrice d'expérience avec réponses pour un plan factoriel complet 2^2	34
Tableau II. 4:: Matrice d'expérience avec effets pour un plan factoriel complet 2^2	35
Tableau II. 5:Tableau d'ANOVA	38

Chapitre III

Tableau III. 1 : résultat de l'expérience	45
Tableau III. 2.Joint de soudeur.....	45
Tableau III. 3.Valeurs des paramètres codés	46
Tableau III. 4.Valeurs de coefficients de chaque facteurs et interactions	47
Tableau III. 5.Tableau globale des facteurs et les interactions	47
Tableau III. 6. Tableau ANOVA.....	48
Tableau III. 7. Variation de température	53

Sommaire

REMERCIEMENTS

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Liste de figure

Liste des tableaux

Sommaire

Introduction générale :1

I. Soudage par friction malaxage et polymères

Introduction :4

I.1. Soudage :4

I.1.1. Définition :4

I.1.2. Historique :4

I.1.3. Types de soudage :5

➤ Soudage à l'arc :6

➤ Soudage par résistance.....7

➤ Soudage par friction7

➤ Soudure à fer8

I.1.4. Soudage par friction malaxage (FSW) :9

I.1.5. Principe de soudage par friction malaxage :9

➤ Phase de pénétration10

➤ Phase de préchauffage10

➤ Phase de soudage.....10

➤ Phase de retrait10

I.1.6. Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW :11

➤ Soudage bout à bout11

➤ Soudage en coin11

➤ Soudage en T.....11

➤ Soudage en Angle.....	12
➤ Soudage recouvrement	12
I.1.7. Les paramètres opératoires du soudage FSW :.....	12
➤ Vitesse de rotation et vitesse d'avance	12
➤ Angle d'inclinaison de l'outil	13
➤ Effort appliqué	13
I.1.8. Les avantages et les inconvénients :.....	13
I.2. Les polymères :	14
I.2.1. Définition des polymères :.....	14
I.2.2. Historique :	14
I.2.3. Classification des polymères :	15
I.2.4. Domaine de l'utilisation :	17
I.2.5. Définition polyéthylène haute densité (PEHD) :	18
I.2.6. Propriétés de PEHD :	18
I.2.7. Avantage et inconvénient de PEHD :.....	20
I.2.8. Domaine d'application :	20
I.2.9. Soudabilité :	21
CONCLUSION :	22

II. Méthode des plans d'expériences

Introduction :	24
II.1. Plan d'expériences :	24
II.1.1. Définition :.....	24
II.1.2. Vocabulaire de base des plans d'expérience :.....	24
II.1.3. Les étapes de plans d'expériences :.....	26
II.1.4. Les types de plan d'expérience :.....	27
II.1.5. Avantage de plan d'expérience :.....	28
II.1.6. Objectif de la modélisation :.....	29
II.1.7. Principes de Base de la modélisation mathématique	30
II.2. Méthode de Plan factoriel complet :	31
II.2.1. Définition :.....	31
II.2.2. Plan factoriel a deux niveaux :.....	32
II.2.3. Constitution du plan factoriel complet :	32

II.2.4. Régression linéaire et analyse du modèle :.....	36
II.2.5. Logiciels de plans d'expériences	40
Conclusion :	41

III. Résultats et discussions

Introduction	43
III.1. Étude expérimentale :	44
III.1.1. Calcule des effets des facteurs et d'interaction :.....	46
III.2. Validation de model :.....	47
III.2.1. Test de Fisher :.....	47
III.2.2. Test de student :	49
III.2.3. Intervalle de confiance des facteurs principaux :.....	52
III.2.4. Exploitation de l'intelligence artificielle sur résultats :.....	53
Conclusion :	55
Conclusion générale :	56
Bibliographie :.....	57

Introduction générale

Dans un contexte industriel en perpétuelle évolution, l'amélioration des procédés d'assemblage est devenue un enjeu stratégique pour de nombreux secteurs, notamment l'aéronautique, le naval et le ferroviaire. Parmi les innovations marquantes du XXI^e siècle, le soudage par friction-malaxage, connu sous le nom de *Friction Stir Welding* (FSW), s'impose comme une avancée technologique majeure. Développé en 1991 par le Welding Institute (TWI) au Royaume-Uni, ce procédé thermomécanique révolutionne le soudage en permettant l'assemblage de matériaux sans atteindre leur point de fusion.

L'essor des alliages légers et des aciers à haute résistance, combiné aux exigences croissantes en matière d'optimisation énergétique et de réduction des coûts de production, a accéléré l'adoption du FSW dans l'industrie. Grâce à une génération de chaleur contrôlée par le frottement d'un outil rotatif, ce procédé offre des soudures de haute qualité, minimisant les défauts métallurgiques et les déformations structurelles.

Bien que le soudage par friction-malaxage (FSW) ait été largement étudié pour les métaux, son application aux polymères est relativement récente. Parmi les polymères thermoplastiques testés, le polyéthylène haute densité (PEHD), reconnu pour sa bonne résistance chimique, sa légèreté et sa facilité de mise en œuvre, suscite un intérêt croissant. Le PEHD, en raison de sa faible température de transition et de ses propriétés thermomécaniques spécifiques, représente un bon candidat pour l'application du FSW dans des domaines tels que le transport, l'emballage et les réseaux de distribution de fluides.

Cette étude vise à analyser les facteurs influençant l'assemblage du polymère PEHD par soudage par friction-malaxage, dans le but d'optimiser ses performances et d'élargir son champ d'applications industrielles.

Ce mémoire porte sur l'analyse expérimentale et la modélisation thermomécanique du soudage par friction de plaques en polymère PEHD et se structure autour de trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique, divisée en deux parties. La première présente les principes du soudage par friction-malaxage (FSW), ses applications, ainsi que les enjeux et perspectives associés. La deuxième partie s'intéresse aux propriétés des

polymères, en particulier le PEHD. Le deuxième chapitre aborde les principes de la modélisation, avec une explication détaillée de la méthode de conception expérimentale.

Enfin, le troisième chapitre analyse les résultats de la modélisation obtenus, en les discutant sous différents aspects. Il se termine par une synthèse récapitulant les principaux objectifs et intérêts de ce travail , suivie d'une partie dédiée à l'exploitation de l'intelligence artificielle (IA) pour l'interprétation et l'optimisation des résultats expérimentaux.

Chapitre I

I. Soudage par friction malaxage et polymères

Introduction

Le soudage par friction malaxage (FSW) est un procédé innovant permettant d'assembler les matériaux sans fusion, ce qui réduit les défauts liés à la solidification et améliore les propriétés mécaniques des joints soudés. Initialement développé pour les alliages métalliques, il s'est progressivement étendu aux polymères, dont le polyéthylène haute densité (PEHD). Ce matériau est largement utilisé pour ses excellentes propriétés chimiques, sa résistance aux chocs et sa bonne aptitude au recyclage.

Cependant, le soudage du PEHD par FSW présente plusieurs défis, notamment sa faible conductivité thermique et sa tendance au fluage sous contrainte, ce qui peut influencer la qualité et la durabilité du joint soudé. Ce chapitre explore en détail le principe du FSW appliqué au PEHD, en analysant les paramètres clés du procédé, les mécanismes de liaison impliqués, ainsi que ses avantages et ses limites pour l'assemblage des polymères thermoplastiques.

I.1. Soudage

I.1.1. Définition

Une opération de soudage a lieu lorsqu'il y a fusion entre deux ou plusieurs pièces métalliques identiques ou différentes sous l'effet d'une chaleur. Une pression et de la chaleur peuvent être appliquées simultanément afin d'atteindre le degré de fusion désiré. C'est un important procédé dans le milieu industriel en raison du fait que, du moins pour la fabrication d'outils et de structures, il peut assurer une soudure forte et durable. Dans le même temps, l'assemblage de parties de la construction aéronautique, automobile et même de pétrole et gaz nécessite une haute qualité. L'industrie a vu une énorme prolifération. Le soudage pour chaque type de métal possède des types spéciaux qui demandent un soin particulier pour satisfaire à leurs exigences.

I.1.2. Historique

Le premier soudage a eu lieu dans l'Antiquité à l'âge du bronze et du fer, principalement avec soudure à la forge. La technique de chauffer et de marteler les pièces ensemble est restée la technique de soudage dominante jusqu'au XIXe siècle.

Vers 1850 une avance significative a été faite en utilisant du gaz pour chauffer les métaux, commençant les techniques modernes. [1] La fin du XIX e siècle voit le développement du

soudage oxyacétylénique, du soudage aluminothermique, du soudage à l'arc électrique et du soudage par résistance qui, à partir des années 1920 intégreront un développement industriel. [2]

Vers le début du XXe siècle, le soudage deviendra commun dans les domaines de l'aéronautique, de la construction navale et de l'automobile, adaptant et changeant les cadres de conception et de construction. Dans les ponts, par exemple, l'introduction de poutres reconstituées soudées change radicalement la construction de ponts [3] [4]

. Dans les années 1930, le métier ayant plus de travailleurs réclamera la formation des ouvriers, donnant, en 1931, naissance au premier CAP de soudeur [5] L'avancée du soudage au 20e siècle s'est faite grâce au développement de techniques comme le soudage par faisceau d'électricité, le soudage par laser, le soudage par ultrasons, ainsi que le soudage par explosion. [6] L'efficacité intégrale de la microélectronique augmentée par la robotisation a amélioré la précision, la qualité et la productivité des processus. [7]

Dans les dernières décennies, le focus a été dans l'actualisation de l'ensemble de la machinerie, des suppléments, et même de l'espace de travail avec ses règles de protection [8]. Il a également été implanté comme le principal procédé utilisé dans une grande variété d'industries, et comme tous les autres procédés, il est adapté aux technologie, matériaux, et exigence moderne avec une puissance de 100 kW/cm. [9]

I.1.3. Types de soudage

Le soudage peut être classifié en plusieurs types :

➤ Soudage au gaz (chalumeau)

Soudage oxyacétylénique ou la coupe et le soudage au chalumeau, ce procédé est effectué par une flamme produit par combustion d'un mélange oxygène et acétylène. Cette flamme sert à chauffer et faire fondre les métaux à assembler. C'est une des techniques les plus utilisées en raison de la grande diversité des matériaux qui peuvent être soudés, tels que l'acier, l'aluminium, le cuivre, ainsi que pour la coupe et le sertissage. [10]



Figure I. 1:soudage au chalumeau. [11]

➤ **Soudage à l'arc**

Cette technique est fondée sur la soudure par fusion des parties de pièces à assembler obtenues par soudage électrique à l'arc. Elle dispose de beaucoup de méthodes par exemple :

- MMA (Manuel à l'électrode enrobée) : L'utilisateur fait fondre l'électrode enrobée qui forme simultanément un arc électrique et fournit du métal en fusion.



Figure I. 2:Soudage MMA. [12]

- TIG (Tungstène Inert Gas) : Utilise une électrode en tungstène non consommable et un gaz inerte – argon comme protection du joint soudé.

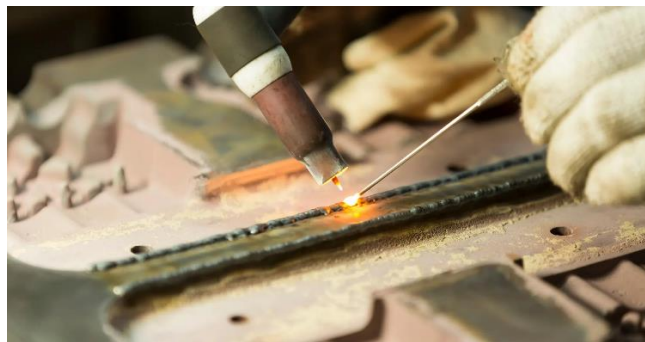


Figure I. 3:Soudage TIG. [13]

- MIG/MAG (Gaz Inerte Métallique / Gaz Actif Métallique) : Utilise un fil plein et un gaz de protection pour protéger le soudage en fusion.



Figure I. 4: Soudage MIG/MAG. [14]

➤ **Soudage par résistance**

Cette technique se base sur la génération de chaleur provient de la résistance des matériaux à souder. À l'aide d'électrodes, un courant élevé est passé à travers les pièces à assembler. Ce courant chauffe localement les pièces, faisant fondre des parties des structures métalliques. Une fois que le métal fondu refroidit et se solidifie, un soudage solide est formé. Elle est principalement utilisée pour l'assemblage de feuilles minces et est largement utilisée dans l'industrie automobile pour les pièces de carrosserie. [15]

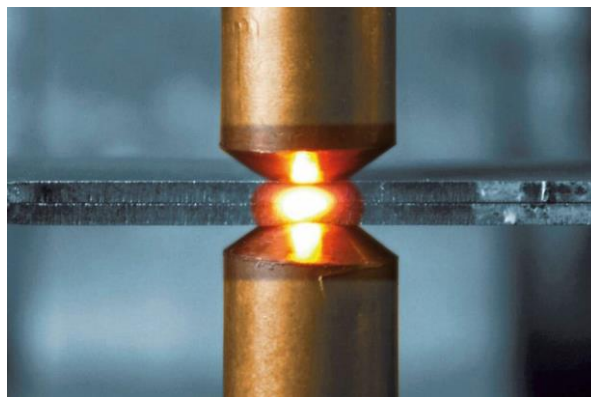


Figure I. 5: Soudage par résistance. [16]

➤ **Soudage par friction**

Il est également appelé soudage par friction ou soudage par friction malaxage en raison de l'utilisation d'un outil rotatif pour mélanger les pièces à assembler. Il est utilisé sur des matériaux difficiles à souder par d'autres procédés tels que le titane et les alliages d'aluminium. [17]

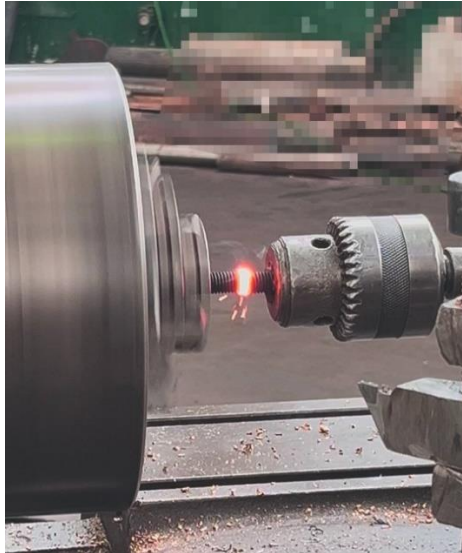


Figure I. 6: Soudage par friction rotative (RFW)

➤ **Soudure à fer**

Un fer à souder, ou plus précisément, un fer à souder est un outil de chauffage conçu pour réaliser une opération de brasage similaire à un poste à souder électrique portable ou plutôt à un chalumeau à gaz (ou chalumeau de brasage).

La détermination d'un procédé de soudage repose sur de nombreuses considérations telles que le type de matériau, l'épaisseur des pièces, les exigences de résistance et les conditions de travail. Pour garantir la qualité et la durabilité à long terme de l'assemblage, il est très important de choisir la bonne méthode. [18]



Figure I. 7: Soudage au fer. [19]

I.1.4. Soudage par friction malaxage (FSW)

Soudage par friction-malaxage également appelé friction stir welding (FSW) est une technique moderne de soudage à l'état solide qui a été développée et brevetée par l'institut soudure britannique The Welding Institute dans les années 1990 [20]; il s'agit d'un procédé de soudage sans fusion dans lequel la chaleur est générée par le frottement d'un outil de soudage rotatif composé d'un pion profilé et d'un épaulement, qui s'enfonce dans les tôles à souder.

L'épaulement entre en contact avec la surface du matériau, produit suffisamment la chaleur par friction pour rendre la matière malléable mais pas assez pour le faire fondre. Lorsque l'outil avance entre les deux tôles, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion, permettant la formation d'un joint soudé solide. [21]

Le soudage par friction-malaxage offre la possibilité de souder des alliages d'aluminium qui ne peuvent pas être assemblés par les méthodes traditionnelles de soudage TIG ou le MIG, et est particulièrement efficace avec les alliages sensibles à la fissuration à chaud, telle que le magnésium et le cuivre dans les applications aéronautiques et automobiles et navales

Le procédé FSW a de nombreux avantages par rapport aux techniques de soudage conventionnelles, notamment une meilleure qualité et résistance des joints, l'absence de porosités et d'infiltrations, ainsi qu'une faible déformation des pièces ; productivité élevée ; pas besoin de gaz de protection ou de métaux d'apport. [22]

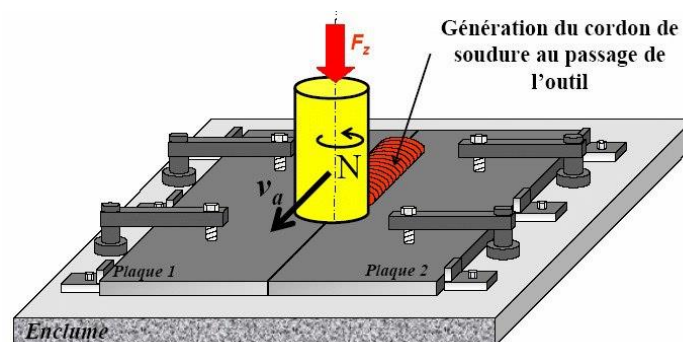


Figure I. 8: Soudage par friction malaxage (FSW). [23]

I.1.5. Principe de soudage par friction malaxage

Le soudage par friction malaxage (FSW) est un procédé d'assemblage à l'état solide qui se déroule en plusieurs phases distinctes :

➤ **Phase de pénétration**

La phase de pénétration de l'outil consiste à enfoncer le pion sous un effort vertical ; Grâce à sa vitesse de rotation, le pion pénètre progressivement le joint jusqu'à ce que l'épaule entre en contact avec les plaques à souder ; L'outil, composé d'un pion de géométrie variable et d'un épaulement dont le diamètre est 2 à 2,5 fois supérieur à celui du pion, est mis en rotation rapide. Sous un effort défini, le pion entre en contact avec la surface des tôles à assembler. La chaleur générée par le frottement entre le pion et la matière provoque un ramollissement local, permettant ainsi la pénétration du pion jusqu'à ce que l'épaule entre en contact avec la surface des pièces. [24]

➤ **Phase de préchauffage**

L'étape transitoire du processus de soudage par friction malaxage (FSW) consiste à entraîner localement l'épaule dans un mouvement de rotation, permettant ainsi de transformer la matière en un état pâteux. Cette phase de pré-soudage dure généralement d'une à trois secondes, avant de passer à l'étape effective de soudage. Afin de générer l'apport de chaleur nécessaire pour obtenir un volume de matière suffisamment pâteux autour de l'outil, celui-ci reste en rotation pendant un temps spécifique appelé "Dwell-time" ou temps de préchauffage (Dt). Ce temps d'échauffement varie en fonction des matériaux à assembler, des épaisseurs des pièces et des configurations d'assemblage, étant nécessaire d'atteindre des températures suffisantes pour rendre les matériaux forgeables. L'échauffement est principalement provoqué par le frottement entre l'outil et les pièces à souder. [25]

➤ **Phase de soudage**

Dans le procédé FSW, l'outil en rotation se déplace le long du joint à souder, générant une liaison par extrusion et forgeage sans atteindre la fusion ; Ce mécanisme favorise la formation d'une structure homogène, évitant les défauts des procédés classiques comme les porosités et la fissuration à chaud. [26]

➤ **Phase de retrait**

À la fin du soudage, l'outil est retiré, laissant une empreinte qui peut être corrigée selon le type de soudure. Pour les soudures linéaires, les défauts aux extrémités peuvent être éliminés, tandis que pour les soudures circulaires, la jonction finale peut être traitée par fusion. L'utilisation d'un outil à pion rétractable permet également de réduire l'empreinte laissée. [27]

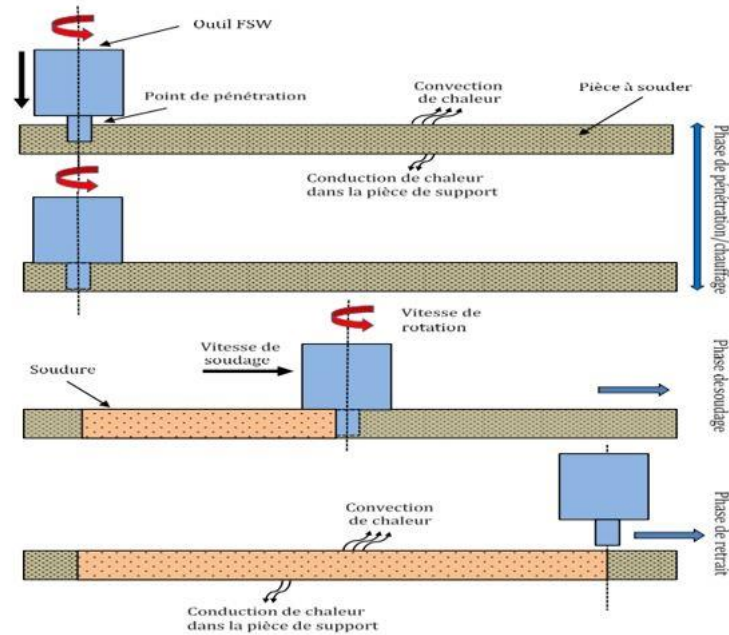


Figure I. 9: Principe de FSW. [28]

I.1.6. Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW

Le procédé de soudage par friction malaxage (FSW – Friction Stir Welding) permet d’assembler divers types de matériaux selon plusieurs configurations de soudage. Ces configurations dépendent principalement de la géométrie des pièces à souder et des exigences mécaniques de l’assemblage. Voici les principales configurations utilisées en FSW :

➤ **Soudage bout à bout**

C’est le cas par exemple de la technologie de soudage par Friction Stir Welding (FSW), où deux plaques sont placées côte à côte et la fraise de soudage se déplace tant de fois le long du bord droit de la feuille pour fabriquer le joint. [29]

➤ **Soudage en coin**

Au sein de cette organisation, les deux éléments à assembler sont orientés de manière à créer un angle de 90°, le dispositif fait le traçage du contour de ce jonction angulaire délimitant ainsi un cordon de soudure le long du bord intérieur créé par les deux plaques [30]

➤ **Soudage en T**

Les deux pièces sont assemblées par l’intermédiaire d’un joint en rapport de perpendiculaire formant un T, l’outil glisse le long de ce joint perpendiculaire, favorisant l’assemblage des deux pièces par glissement et chaleur par frottement dans le joint. [31]

➤ **Soudage en Angle**

Les deux parties à souder sont mises à un angle déterminé. L'instrument effectue la mise en forme par traçage du contour de l'articulation angulaire pour permettre de réaliser un cordon de soudure sur l'assemblage oblique des deux tôles. On peut adapter la structure de la pièce en fonction des contraintes de conception. [32]

➤ **Soudage recouvrement**

Dans un assemblage à recouvrement, les deux pièces à souder se superposent. La soudure est praticable à l'intersection des surfaces en contact. L'épaisseur de la pièce à souder joue un rôle déterminant sur la zone de recouvrement. Plus la pièce à souder est épaisse, plus est importante la surface de recouvrement nécessaire.

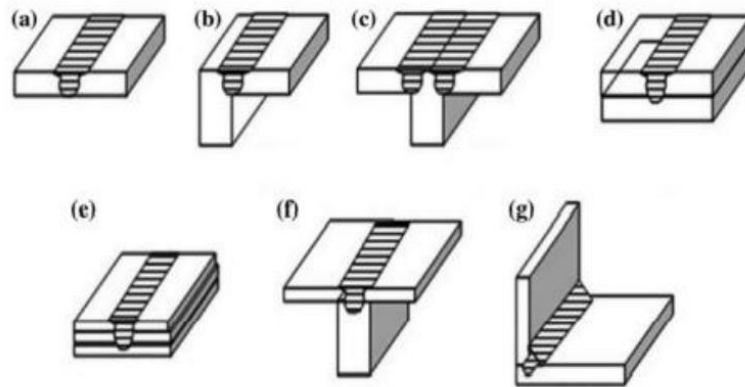


Figure 1.10: Configurations de joints pour le soudage par friction malaxage : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle. [33]

I.1.7. Les paramètres opératoires du soudage FSW

➤ **Vitesse de rotation et vitesse d'avance**

La vitesse de mouvement ainsi que la vitesse de rotation de l'outil qui pénètre le matériau, à souder. Pour chaque matériau, on dispose d'une plage de paramètres de soudabilité qui définit, pour chaque configuration de la vitesse de rotation et de la vitesse translationnelle (ou vitesse de soudage), celles qui permettent d'atteindre une soude de qualité.

Le rapport de soudage résulte du rapport entre la vitesse d'avance et la vitesse de rotation. On parle de soudage à chaud pour une petite valeur, compte tenu du fort taux d'alliage et de la chaleur importante générée par frottement à la surface qui dégage des températures très élevées. On qualifie de soudage à froid la grande valeur, où la chaleur résultant du frottement de l'outil sur la surface des plaques et dans le mélange n'est pas suffisante pour atteindre des températures trop élevées dans les pièces. [34]

➤ **Angle d'inclinaison de l'outil**

La pente de l'instrument par rapport à la surface des plaques à souder est un élément crucial à considérer lors de l'optimisation du processus, car une sélection adéquate favorise le déplacement efficace du matériau de l'avant vers l'arrière du pion [35]

➤ **Effort appliqué**

Durant le processus de soudage par friction-malaxage, l'outil tournant entraîne le métal plastifié vers la surface de la soudure. Le métal est poussé par l'outil vers l'épaulement où la pression tend à désolidariser l'outil du joint. Pour maintenir ce contact, une force doit être exercée dans la verticalité de l'outil. L'interaction entre l'outil en rotation et la pièce s'accompagne d'une élévation de la température. La quantité de chaleur échangée dépend de la force exercée, du coefficient de frottement à l'interface outil-pièce, de la nature de l'outil, mais aussi de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance, ce qui démontre l'intérêt de maîtriser cette force afin de rassembler toutes les conditions fondamentales au soudage pour obtenir un joint parfait. En parallèle des autres paramètres du processus, elle doit être prise en compte pour assurer une bonne adhérence des deux éléments de joint. La figure suivante montre les différentes forces mises en jeu autour de l'outil et des pièces à souder durant le soudage FSW. La définition de ces forces a pour but de réduire la complexité, d'accroître les capacités de la machine à souder, mais également de minimiser le coût des opérations de soudage. [36]

I.1.8. Les avantages et les inconvénients

➤ **Avantages**

- **Soudage à l'état solide** : Le FSW est un procédé de soudage à l'état solide qui n'implique aucune fusion et aucun ajout de matière. Il n'émet ni gaz toxique ni rayonnement UV. La consommation d'énergie est réduite par rapport aux autres techniques de soudage (TIG, MIG, EBW).
- **Soudage de matériaux similaires et dissemblables** : Le FSW permet l'assemblage de matériaux tels que les alliages d'aluminium, reconnus comme difficilement soudables.
- **Automatisation facile** : Le FSW est facile à automatiser et à industrialiser.
- **Qualité et solidité** : Le procédé fournit des connexions de haute qualité
- **Grande flexibilité de conception** : Le FSW permet l'assemblage rentable de géométries complexes en 3D.

- **Résultat esthétique** : Le FSW offre un résultat esthétiquement plaisant, minimisant le besoin d'un usinage coûteux après le soudage.
 - **Moins de préparation requise** : Le FSW ne nécessite pas de préparation spéciale de la zone avant le soudage, ce qui permet d'accélérer le processus.
- **Inconvénients**
- **Fixation compliquée** : Le FSW nécessite un serrage rigide et robuste des pièces.
 - **Trou de sortie visible** : Le procédé peut laisser un trou de sortie lorsque l'outil est retiré.
 - **Pas de joints de remplissage** : Le FSW exige un ajustement précis des bords à assembler, car il n'y a pas de matériau supplémentaire pour stabiliser les matériaux et remplir les espaces au fur et à mesure qu'ils sont soudés.
 - **Coût d'installation élevé** : Le FSW nécessite des équipements spécifiques, ce qui peut entraîner des coûts d'installation élevés.
 - **Inadapté aux matériaux non forgeables** : Certains matériaux ne peuvent pas être soudés par FSW.

I.2. Les polymères

I.2.1. Définition des polymères

Une substance est dite plastique lorsqu'elle durcit après un processus de transformation (chaleur, tension, compression, etc.). Le terme « plastique » vient du grec *plastikos*, qui signifie « façonner ». Par définition, un plastique est un polymère, une matière composée de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules, constituées de monomères. En 1920, Hermann Staudinger a démontré que les plastiques sont faits de ces macromolécules. Par exemple, le polyéthylène est formé d'unités répétitives $-CH_2-CH_2-$, issues de la molécule d'éthylène (C_2H_4), pouvant atteindre des millions d'unités.

I.2.2. Historique

L'utilisation des polymères naturels remonte à l'Antiquité, mais leur étude scientifique débute au XIXe siècle. [37] En 1838, Anselme Payen identifie la cellulose, un polymère naturel présent dans le bois. Peu après, en 1844, Charles Goodyear met au point la vulcanisation du caoutchouc, un procédé qui améliore sa résistance et son élasticité. En 1846, Christian Schönbein développe la nitrocellulose, considérée comme le premier polymère artificiel. [38]

Le terme polymère apparaît en 1866 grâce à Marcellin Berthelot, qui observe la polymérisation du styrène en une résine solide. À la fin du XIXe siècle, l'industrialisation des polymères commence avec la soie artificielle mise au point par Hilaire de Chardonnet en 1883. [39]

Le début du XXe siècle marque une avancée majeure avec la synthèse du premier polymère entièrement artificiel : la bakélite, développée en 1910 par Leo Baekeland. Ce matériau thermodurcissable ouvre la voie à l'industrie des plastiques. [40]

Dans les années 1920, Hermann Staudinger révolutionne la compréhension des polymères en introduisant la notion de macromolécules, réfutant ainsi l'idée qu'ils ne sont que des agrégats de petites molécules. Ses travaux lui valent le prix Nobel de chimie en 1953 [41]

L'essor des polymères s'accélère au cours de la Seconde Guerre mondiale, notamment aux États-Unis, où la pénurie de caoutchouc naturel pousse au développement de substituts synthétiques. Des polymères essentiels comme le nylon (1938) et les polyuréthanes (1943) apparaissent alors. [42]

Dans les années 1950, le développement de la pétrochimie permet la production économique des thermoplastiques modernes, dont le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC), grâce aux travaux de Karl Ziegler (1953) et Giulio Natta (1954). [43]

Depuis la fin du XXe siècle, la recherche se concentre sur les polymères techniques et écologiques, avec l'apparition des bioplastiques, des polymères conducteurs et des polymères à mémoire de forme. Les travaux de Shirakawa, Heeger et MacDiarmid sur les polymères conducteurs leur valent le prix Nobel en 2000. [44]

I.2.3. Classification des polymères

Les polymères sont divisés en trois parties, suivant des différences de structures macromoléculaires aboutissant à des différences importantes dans les propriétés thermomécaniques :

➤ **Selon l'origine**

- **Polymères naturels** : Ces polymères se trouvent dans la nature et sont fabriqués par des organismes vivants. Tel que la cellulose, le caoutchouc et les résines. [45]

- **Les polymères artificiels** : Les polymères artificiels sont un composé obtenu par le traitement concernant la modification chimique de polymères naturels, de manière à changer certaines de leurs propriétés. [46]
- **Polymères synthétiques** : issus de réactions de polymérisation ou de polycondensation, sont obtenus à partir de monomères et présentent une grande diversité d'applications.

➤ **Selon les propriétés**

- **Thermoplastiques** : les polymères deviennent souples sous l'effet de la chaleur, ce qui leur permet d'être remodelés à plusieurs reprises sans subir de modifications chimiques significatives. Des exemples incluent le polyéthylène (PE), le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS). [47]
- **Thermodurcissables** : Une fois qu'ils ont été durcis par la chaleur ou une réaction chimique, ces polymères ne peuvent plus être remodelés. Ils forment des structures rigides tridimensionnelles. Parmi eux, on trouve les résines époxy, les phénoplastes et les aminoplastes. [48]
- **Élastomères** : Ces polymères se distinguent par leur grande capacité d'élasticité, leur permettant d'être étirés tout en retrouvant leur forme d'origine. Le caoutchouc, qu'il soit naturel ou synthétique, en est un exemple [49]

➤ **Selon la structure**

- **Polymères linéaires** : Dans cette catégorie, les monomères sont unis en une chaîne simple, sans toutes ramifications. Un exemple en est le polyéthylène haute densité (PEHD). [47]
- **Polymères ramifiés** : Ces polymères possèdent des chaînes principales dotées de ramifications ou de chaînes latérales. Le polyéthylène basse densité (PEBD) en constitue un exemple. [50]
- **Polymères réticulés ou en réseau** : ici, les chaînes polymériques sont interconnectées, formant ainsi un réseau tridimensionnel. Les résines phénoliques représentent ce type de structure. [51]

➤ **Selon leurs domaines d'applications**

Il est cependant possible de regrouper les polymères en trois grandes catégories :

- **Les polymères de grande diffusion** : ou polymères de commodité, sont produits en millions de tonnes chaque année et largement utilisés au quotidien. Parmi eux, le polyéthylène, le polystyrène et le PVC occupent une place majeure dans l'industrie.
- **Les polymères techniques** : possèdent des caractéristiques mécaniques qui leur permettent de remplacer de plus en plus les matériaux traditionnels tels que les métaux et les céramiques dans de nombreuses applications. Parmi eux, on trouve les polyamides et les polyacétals. [52]
- **Les polymères spéciaux : (ou polymères de fonction)** : possèdent des propriétés spécifiques qui déterminent leur usage, comme les polymères conducteurs, photoactifs ou thermostables. Leur classification peut varier selon les experts. [53]

I.2.4. Domaine de l'utilisation

Les polymères ont des multiples applications dans tous les secteurs industriels.

Tableau I. 1:Domaine d'utilisation des polymères

Secteur	Utilisation des Polymères	Exemple Visuel
Industrie des Plastiques	Fabrication d'emballages, bouteilles, sacs et autres produits plastiques.	Sacs en polyéthylène utilisés pour l'emballage alimentaire et les sacs plastiques.
Industrie Textile	Production de vêtements, textiles techniques et vêtements de sport grâce à leur élasticité, résistance et durabilité.	Le nylon, un polymère synthétique, est couramment utilisé dans la fabrication de vêtements.
Applications Biomédicales	Conception d'implants, prothèses, dispositifs médicaux et emballages pharmaceutiques grâce aux polymères biocompatibles et biodégradables.	Les polymères biocompatibles sont utilisés pour les implants médicaux et les prothèses.
Industrie Automobile et Aéronautique	Fabrication de composants légers et résistants pour voitures, avions et fusées afin d'améliorer la performance et réduire le poids.	---

Enjeux Environnementaux	Problèmes liés à la non-biodégradabilité des plastiques et à leur accumulation dans les océans et décharges. Développement de polymères biodégradables et recyclage.	Accumulation des déchets plastiques dans les océans.
--------------------------------	---	--

I.2.5. Définition polyéthylène haute densité (PEHD)

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un polymère thermoplastique obtenu par polymérisation de l'éthylène et fabriqué à partir du pétrole. Il se distingue par sa densité élevée (généralement entre 0,93 et 0,97 g/cm³), sa rigidité et sa résistance aux chocs, aux produits chimiques et aux intempéries. Grâce à ses propriétés mécaniques et chimiques, il est utilisé dans divers secteurs, notamment pour la fabrication de tuyaux, de réservoirs, d'emballages alimentaires, de bidons, de jouets et de films plastiques. Le PEHD est également apprécié pour sa recyclabilité, ce qui en fait un matériau prisé dans une approche de développement durable. [54]

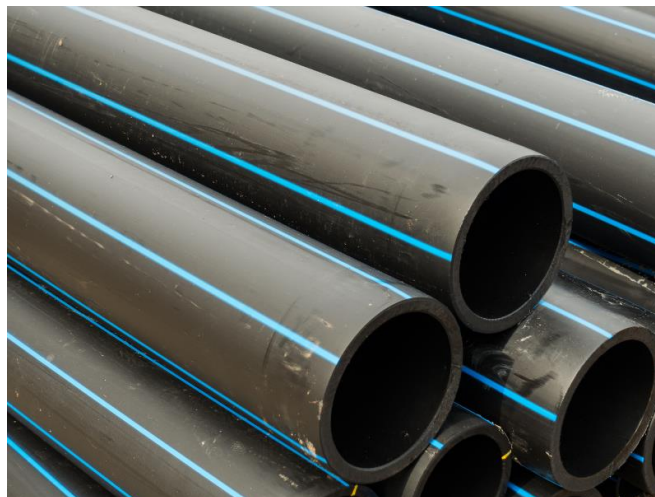


Figure I. 11: Polyéthylène haute densité

I.2.6. Propriétés de PEHD

➤ **Propriétés mécaniques**

- **Résistance à la traction (Rm) :** PEHD présente une résistance à la traction élevée, elle est variée généralement entre 20 et 37 MPa, selon la densité et les conditions d'utilisation.

- **Module d'élasticité** : relativement faible (environ 800 à 1500 MPa), ce qui lui confère une certaine flexibilité. [55]
- **Dureté** : e PEHD a un indice de dureté SD65, le SD correspondant à l'écart-type. En raison de sa haute densité, le PEHD est très rigide et dur, de sorte qu'il ne se déforme pas.
- **Résistance aux chocs** : le PEHD présente une grande résistance aux chocs.
- **Allongement à la rupture** : entre 20 – 1000 %

➤ **Propriété physique**

- **Densité** : La densité du PEHD est généralement comprise entre 0,93 et 0,97 g/cm³.
- **Structure** : C'est une polyoléfine semi-cristalline, ce qui lui confère une combinaison de rigidité et de ténacité.

➤ **Propriétés thermiques**

- **Température de fusion** : Le PEHD fond à des températures comprises entre 124 et 135 °C.
- **Température d'utilisation** : Il peut être utilisé en continu jusqu'à environ 90 °C.
- **Température de fragilisation** : Le PEHD devient fragile à des températures avoisinant -110 °C.

➤ **Résistance chimique**

- **Résistance élevée** : Le PEHD résiste très bien aux acides, aux alcools aliphatiques, aux aldéhydes, ainsi qu'aux hydrocarbures aliphatiques et aromatiques.
- **Sensibilité** : Il est toutefois moins résistant aux agents oxydants, ce qui peut faciliter l'installation d'un biofilm indésirable.

➤ **Comportement aux rayonnements**

- **Résistance aux rayonnements UV** : Le PEHD est sensible aux rayonnements ultraviolets, ce qui peut entraîner une dégradation de ses propriétés mécaniques et une
- Fragilisation du matériau. Pour améliorer sa résistance aux UV, des additifs tels que des stabilisants ou des absorbeurs d'UV sont souvent incorporés lors de sa fabrication.
- **Résistance aux rayonnements ionisants** : Le PEHD présente une résistance modérée aux rayonnements ionisants (comme les rayons gamma ou les rayons X). Une exposition

prolongée ou à des doses élevées peut provoquer des modifications de sa structure moléculaire, entraînant une dégradation de ses propriétés mécaniques et physiques.

I.2.7. Avantage et inconvénient de PEHD

- **Avantage** : Le PEHD présente plusieurs avantages :
 - **Haute résistance aux chocs** : Supporte bien les impacts sans se casser.
 - **Excellente résistance chimique** : Résiste aux acides, bases et solvants, ce qui en fait un matériau idéal pour le stockage de produits chimiques.
 - **Léger mais solide** : Possède un bon rapport résistance/poids, facilitant son transport et son utilisation.
 - **Bonne résistance aux intempéries** : Résistant à l'humidité et aux températures extrêmes, ce qui le rend adapté aux applications extérieures.
 - **Recyclable** : Peut être réutilisé et transformé en nouveaux produits, contribuant à une économie circulaire.
 - **Facilité de mise en œuvre** : Facile à mouler, souder et extruder pour diverses applications industrielles et domestiques.
- **Inconvénient** : Lorsqu'un matériau présente plusieurs avantages, il y a toujours quelques inconvénients :
 - **Sensibilité aux UV sans additif** : Peut se dégrader sous l'effet des rayons ultraviolets s'il n'est pas traité avec des stabilisants.
 - **Faible résistance à la chaleur élevée** : Se ramollit au-delà de 90-120 °C, ce qui limite son utilisation dans des environnements très chauds.
 - **Inflammabilité** : Peut brûler en présence de flammes, nécessitant des additifs ignifuges pour certaines applications.
 - **Faible résistance aux agents oxydants forts** : Peut être dégradé par des oxydants puissants, réduisant ainsi sa durée de vie dans certains environnements.
 - **Problème de biodégradabilité** : Bien qu'il soit recyclable, il reste un plastique qui met plusieurs décennies à se décomposer dans l'environnement.

I.2.8. Domaine d'application

Grâce à ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques, le PEHD est utilisé dans de nombreux domaines :

Tableau I. 2:Domaine d’application de PEHD

Secteur :	Applications :
Industrie et Construction	<ul style="list-style-type: none"> - Tuyaux et canalisations : transport d’eau potable, eaux usées, gaz. - Géomembranes : revêtements d’étanchéité pour bassins, décharges, toitures. - Réservoirs et cuves : stockage de produits chimiques et carburants
Usage Domestique et Emballage	<ul style="list-style-type: none"> - Bouteilles en plastique : lait, shampoing, détergents. - Sacs et films plastiques : sacs réutilisables, bâches de protection. - Conteneurs alimentaires : boîtes hermétiques, bidons
Automobile et Transport	<ul style="list-style-type: none"> Réservoirs de carburant : légèreté et résistance chimique. - Pièces de voiture : gaines de câbles, pare-chocs, revêtements intérieurs.
Agriculture et Environnement	<ul style="list-style-type: none"> - Serres agricoles : bâches de protection contre les UV et l’humidité. - Filets et tuyaux d’irrigation : pour l’arrosage agricole. - Produits recyclés : bancs, palettes en plastique, planches composites.
Médical et Pharmaceutique	<ul style="list-style-type: none"> Emballages de médicaments : flacons, capsules, seringues. - Équipements médicaux : tubes et accessoires résistants aux produits chimiques.
Loisirs et Sport	<ul style="list-style-type: none"> - Jouets en plastique : robustesse et sécurité pour les enfants. - Équipements nautiques : kayaks, bateaux légers et insubmersibles

I.2.9. Soudabilité

Le PEHD est un matériau thermoplastique, ce qui signifie qu'il peut être soudé à l'aide de plusieurs techniques. Sa soudabilité est un atout majeur dans des applications industrielles comme la plomberie, la fabrication de réservoirs ou la construction de géomembranes.

➤ **Méthodes de soudage du PEHD**

- **Soudage par extrusion**

- Utilisé pour assembler des plaques ou des tuyaux PEHD.
- Un fil de PEHD fondu est déposé entre les pièces à souder.

- **Soudage par électro fusion**

- Méthode courante pour raccorder des canalisations en PEHD.
- Des raccords équipés de résistances chauffantes font fondre le PEHD pour assurer une liaison étanche.

- **Soudage bout à bout**

- Deux extrémités de pièces en PEHD sont chauffées puis pressées l'une contre l'autre pour fusionner.
- Très utilisé pour l'assemblage de tuyaux haute pression.

- **Soudage à air chaud**

- Similaire au soudage par extrusion mais avec un apport de chaleur par un flux d'air chaud.
- Adapté aux réparations et aux assemblages de petites pièces.

- **Avantages de la soudabilité du PEHD**

- Assure une jonction solide et étanche entre les pièces.
- Résiste aux produits chimiques et aux pressions élevées.
- Permet la fabrication de grandes structures sans raccord mécanique.
- Convient à des applications souterraines et immergées.

Conclusion

Ce chapitre traite des techniques de soudage, en particulier du soudage par friction-malaxage (FSW), et de l'assemblage des polymères, notamment du polyéthylène haute densité (PEHD). Le FSW, un procédé sans fusion, est particulièrement adapté aux matériaux non ferreux, offrant des joints solides tout en réduisant la distorsion thermique. Le PEHD est un polymère apprécié pour sa résistance, mais sa souderie présente des défis en raison de ses caractéristiques thermiques. Le chapitre explore également l'application du FSW pour le soudage du PEHD, une voie prometteuse pour améliorer la qualité et la durabilité des joints dans diverses applications industrielles

Chapitre II

II. Méthode des plans d'expériences

Introduction

La méthode des plans d'expériences (DOE) est une approche statistique permettant d'optimiser un procédé en étudiant efficacement l'influence de plusieurs paramètres. Son application à la modélisation du soudage par friction-malaxage (FSW) des polymères permet de réduire le nombre d'expériences tout en maximisant l'information obtenue. Ce chapitre présente les principes fondamentaux de cette méthode, ses étapes de mise en œuvre, ainsi que ses avantages pour l'analyse et l'optimisation des procédés.

II.1. Plan d'expériences

II.1.1. Définition

La méthode des plans d'expériences (MPE), également connue sous le nom de Design of Experiment (DOE), est une approche statistique permettant de concevoir, réaliser et analyser des expériences de manière optimisée. Elle sert à évaluer l'influence simultanée de plusieurs variables d'entrée X appelées facteurs sur une variable de sortie Y appelées réponse afin d'améliorer un processus. Contrairement à la méthode classique qui analyse un facteur à la fois (UFAF), la MPE minimise le nombre d'essais nécessaires tout en offrant une meilleure compréhension des interactions entre les facteurs. Des logiciels tels que Matlab et MiniTab sont couramment utilisés pour faciliter ces analyses. [56]



II.1.2. Vocabulaire de base des plans d'expérience

Voici quelques termes de base utilisés en plans d'expériences (Design of Experiments, DOE) en méthodologie de la recherche expérimentale :

- **La réponse** : Une réponse expérimentale est une mesure observable qui évalue l'effet des facteurs sur un système. Elle peut être quantitative (rendement, résistance) ou qualitative (évaluation visuelle). L'objectif est d'identifier les facteurs influençant cette réponse, avec une préférence pour les données quantitatives, plus faciles à analyser. [57]
- **Les facteurs** : influençant un processus se divisent en deux types : contrôlables et non contrôlables. Les premiers, aussi appelés variables indépendantes, peuvent être directement ajustés par l'expérimentateur, tandis que les seconds génèrent une

variabilité dans les résultats. Ces facteurs peuvent être quantitatifs, lorsqu'ils sont mesurables (ex. : température), ou qualitatifs, lorsqu'ils reposent sur des catégories (ex. : présence ou absence d'un ingrédient). Ils peuvent également être continus (valeurs infinies dans un intervalle) ou discontinus (valeurs spécifiques). Généralement, chaque facteur est défini par deux niveaux : un niveau bas (-1) et un niveau haut (+1), facilitant l'analyse de son influence sur le processus. [56] [57]

- **Niveaux et domaine d'étude** : En plans d'expériences, un facteur varie entre un niveau bas (-1) et un niveau haut (+1), définissant son domaine d'étude. L'ensemble des variations des k facteurs forme un espace k-dimensionnel, appelé domaine de recherche, où chaque point représente une configuration spécifique.

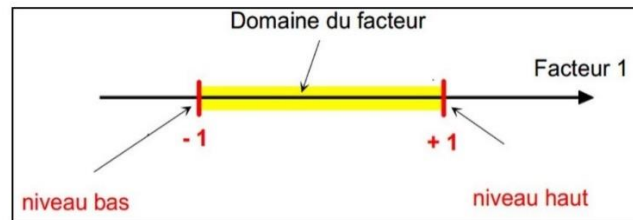


Figure II. 1:Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs [58]

L'effet d'un facteur se manifeste par la variation de la réponse lorsqu'on modifie son niveau. L'interaction entre deux facteurs représente l'influence conjointe de ces derniers sur la réponse. Lorsqu'un second facteur est pris en compte, il est également représenté par un axe, avec un niveau bas, un niveau haut et un domaine de variation définis de manière similaire au premier. Cet axe est disposé perpendiculairement au premier, constituant ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions, appelé espace expérimental. [59]

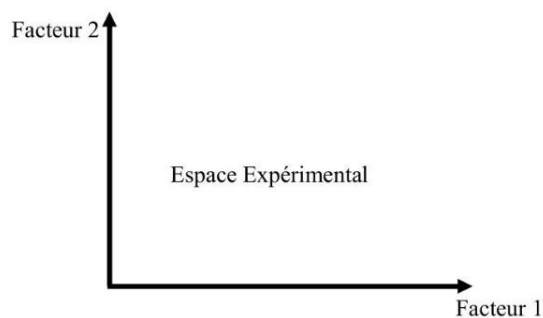


Figure II. 2:L'espace expérimental

Le niveau x du facteur 1 et le niveau x du facteur 2 peuvent être interprétés comme les coordonnées d'un point dans l'espace expérimental.

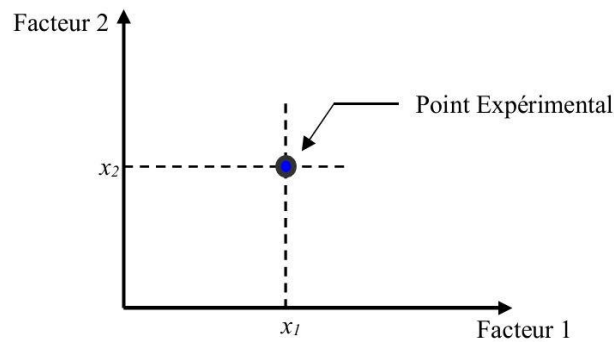


Figure II. 3: point dans l'espace expérimental.

Une expérience donnée est ainsi représentée par un point dans ce repère. Un plan d'expériences correspond alors à un ensemble de points expérimentaux.

- **Une interaction** : se produit lorsque l'effet d'un facteur varie en fonction d'un autre. Elle représente la combinaison de leurs impacts et son ordre correspond au nombre de facteurs impliqués moins un.

II.1.3. Les étapes de plans d'expériences

- 1) **Définition des objectifs** : Identifier clairement ce que l'expérience vise à démontrer, en établissant et en priorisant les objectifs avec l'équipe.
- 2) **Sélection des facteurs, niveaux et réponses** : Déterminer les variables à étudier, leurs niveaux de variation et les réponses à mesurer tout en s'assurant de la faisabilité des combinaisons expérimentales.
- 3) **Choix du plan expérimental** : Sélectionner un plan adapté aux objectifs et aux ressources disponibles (factoriel complet, fractionné, séquentiel, etc.).
- 4) **Conception de l'expérience** : Organiser les essais en définissant l'ordre et les conditions expérimentales afin d'assurer la fiabilité des résultats.
- 5) **Exécution du plan et collecte des données** : Réaliser les essais en respectant les conditions définies et enregistrer avec précision les résultats obtenus.
- 6) **Vérification et analyse des données** : Examiner la cohérence des données avec les hypothèses de départ et analyser statistiquement les résultats pour identifier les effets des facteurs.

- 7) **Interprétation des résultats et recommandations** : Tirer des conclusions, comparer avec les hypothèses initiales et formuler des recommandations pour améliorer le processus étudié.

II.1.4. Les types de plan d'expérience

Ils se classent en plusieurs catégories selon leur complexité et leur objectif. Voici les principales classes

- **Plans factoriels**

Ils analysent simultanément plusieurs facteurs en testant différentes combinaisons de leurs niveaux.

Plans factoriels complets : Ils évaluent toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs, offrant une analyse exhaustive mais nécessitant un grand nombre d'expériences.

Plans factoriels fractionnaires : Pour réduire le nombre d'expériences, seule une fraction des combinaisons est testée, permettant d'analyser les effets principaux et certaines interactions tout en économisant du temps et des ressources.

- **Plans de surface de réponse (RSM - Response Surface Methodology)**

Utilisés pour modéliser et optimiser les réponses d'un processus en fonction de plusieurs variables.

Plans de Box-Behnken : Réduisent le nombre d'expériences en évitant les combinaisons extrêmes, limitant ainsi les risques liés aux valeurs limites des facteurs.

Plans central composite (CCD - Central Composite Design) : Contiennent des points centraux et étoilés pour mieux estimer la courbure de la réponse et affiner l'optimisation du processus.

- **Plans de mélanges**

Conçus pour analyser l'influence des proportions de plusieurs composants dans un mélange, tels que les formulations chimiques, les alliages ou les polymères. Contrairement aux autres plans, les proportions doivent respecter une contrainte de somme (ex. : 100 % d'un mélange).

- **Plans Taguchi**

Méthode robuste utilisant des matrices orthogonales pour optimiser les processus avec un nombre réduit d'expériences. Cette approche améliore la qualité et la robustesse en minimisant l'influence des facteurs extérieurs et des variations environnementales. Elle est particulièrement utilisée dans l'industrie pour garantir une production stable et efficace.

- **Plans de criblage (Screening Designs)**

Utilisés pour identifier les facteurs les plus influents parmi un grand nombre de variables, notamment en phase préliminaire d'étude.

Plans de Plackett-Burman : Optimisent les essais avec un minimum d'expériences, en identifiant rapidement les facteurs significatifs.

Plans de Taguchi de criblage : Basés sur des matrices orthogonales, ils permettent une analyse efficace des effets principaux avec peu d'expériences.

- **Plans optimaux (Optimal Designs)**

Ces plans sont générés algorithmiquement en fonction des contraintes et objectifs spécifiques de l'expérimentation.

Plans D-optimaux : Minimisent l'incertitude des coefficients du modèle statistique pour maximiser la précision des estimations.

Plans I-optimaux : Conçus pour minimiser l'erreur de prédiction, permettant ainsi d'obtenir des résultats plus précis et fiables sur l'ensemble des valeurs expérimentales possibles.

II.1.5. Avantage de plan d'expérience

Le plan d'expérience (DOE) est une méthode statistique permettant d'optimiser les expériences en analysant plusieurs facteurs simultanément. Ses principaux avantages sont :

- Réduction des coûts et du temps en limitant le nombre d'essais nécessaires.
- Amélioration de la précision en identifiant les interactions entre les paramètres.
- Optimisation des performances en trouvant les conditions idéales d'un procédé.
- Approche scientifique permettant une modélisation et des prédictions fiables.
- Applications variées en industrie, recherche et ingénierie, y compris en soudage FSW et dans le domaine des polymères

II.1.6.Objectif de la modélisation

L'application de ces modèles ouvre un vaste champ de possibilités et s'adapte à une multitude d'objectifs, en fonction des besoins et des exigences spécifiques.

Objectif 1 : Prédiction des résultats

Grâce au modèle mathématique établi, il est possible de prévoir la réponse en un point donné à l'intérieur des limites des domaines expérimentaux. L'ensemble de ces prévisions, appliqué à l'ensemble du domaine d'étude, forme une surface appelée "surface de réponse", illustrée en détail dans la Figure. [60]

Déterminer le nombre optimal de points d'expérience ainsi que leur disposition constitue un enjeu majeur dans la conception des plans d'expériences. L'objectif est d'assurer une grande précision de la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences nécessaires.

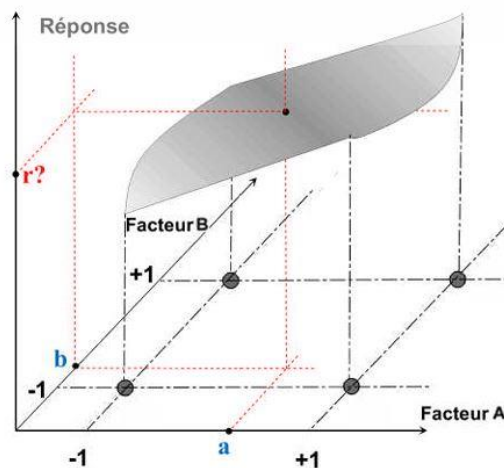


Figure II. 4: La surface de réponse.

Objectif 2 : Optimisation des paramètres

L'optimisation des processus vise à déterminer les valeurs idéales des paramètres d'entrée afin d'obtenir les résultats escomptés. Ces objectifs englobent généralement l'amélioration du rendement, la réduction du temps de production ou le respect des spécifications du produit.

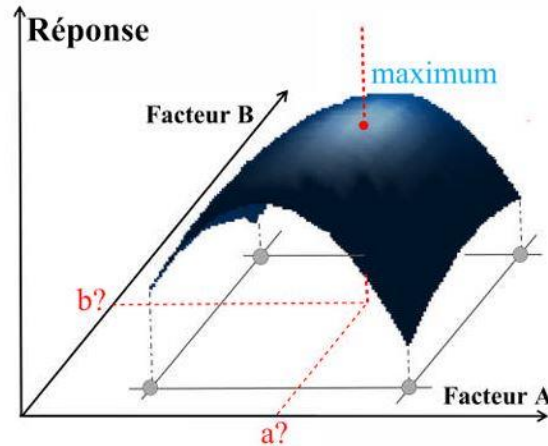


Figure II. 5: L'optimisation de la réponse

II.1.7. Principes de Base de la modélisation mathématique

Dans un premier temps, une fonction mathématique est sélectionnée pour décrire la relation entre la réponse et les facteurs. Afin de simplifier cette relation, on utilise un développement en série de Taylor-Maclaurin, en supposant des dérivées constantes. Cela aboutit à une expression polynomiale dont le degré dépend du niveau de complexité souhaité.

$$y_i = a_0 + \sum X_i a_i + \sum X_i X_j a_{ij} + \dots + \sum X^2 a_{ii} + a_{jj \dots z} X_i X_j \dots X_z \quad (\text{II.1})$$

Où :

- La variable " y ", mesurée avec précision lors des expériences, représente la réponse recherchée.
- Les niveaux "xi" correspondent aux valeurs attribuées aux facteurs par l'expérimentateur pour chaque essai, supposées exactes et sans erreur selon l'hypothèse classique en régression.
- Les coefficients "a0, ai, aij, aii" du modèle mathématique choisi doivent être estimés à partir des données expérimentales, car leur valeur n'est pas connue à l'avance.

L'intérêt majeur de l'utilisation d'un polynôme pour modéliser la réponse réside dans sa capacité à prédire l'ensemble des résultats possibles au sein du domaine d'étude, évitant ainsi le recours à des expérimentations réelles. Ce type de modèle est couramment appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori".

Pour simplifier l'analyse, les deux sources d'écart – le manque d'ajustement et l'erreur expérimentale – sont généralement regroupées en une seule variable, notée "e". Ainsi, le modèle utilisé par l'expérimentateur s'exprime sous la forme suivante :

$$y_i = a_0 + \sum X_i a_i + \sum X_i X_j a_{ij} + \dots + \sum X^2 a_{ii} + a_{jj \dots z} X_i X_j \dots X_z + e \quad (\text{II.2})$$

➤ **Les aspects clés de la régression linéaire multiple dans le contexte de la modélisation**

La régression linéaire multiple porte sur l'analyse de données quantitatives dont l'objectif principal est d'essayer d'expliquer comment une réponse d'une variable y varie en fonction d'une ou plusieurs variables explicatives x1, x2, ..., xk.

$$y = (x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (\text{II.3})$$

➤ **Variables codées**

L'utilisation de variables centrées et codées dans la plage de -1 à +1 permet de standardiser le domaine de variation pour tous les facteurs, ce qui facilite la généralisation de la théorie des plans d'expériences. En utilisant des variables codées, chaque facteur possède un domaine de variation standardisé de [-1, +1], ce qui simplifie la comparaison de leurs effets. Dans le modèle final, ce sont ces variables codées, sans dimensions et comprises entre -1 et +1, qui sont utilisées :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{min,i} + u_{max,i}}{2}\right)}{\left(\frac{u_{max,i} - u_{min,i}}{2}\right)} \quad (\text{II.4})$$

Où : • xi est la valeur codée

- ui est la valeur réelle du facteur.
- u_{mini} est la valeur minimale du facteur.
- u_{maxi} est la valeur maximale du facteur.

II.2. Méthode de Plan factoriel complet

II.2.1. Définition

Un plan factoriel est une méthode expérimentale utilisée pour étudier l'effet de plusieurs facteurs simultanément. Il permet d'analyser les interactions entre ces facteurs en testant toutes les combinaisons possibles à l'intérieur d'un domaine d'étude. Un plan factoriel complet réalise

toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs, et le nombre total d'essais N se calcule par la formule : $N=2^k$, où k représente le nombre de facteurs étudiés.

II.2.2. Plan factoriel a deux niveaux

Un plan factoriel à deux niveaux est une méthode expérimentale où chaque facteur est évalué à deux niveaux distincts (-1 et +1). Cette approche permet de réduire le nombre d'essais tout en analysant l'effet de chaque facteur et leurs interactions. Elle est applicable aux variables continues et discrètes et convient aux modèles linéaires, bien qu'elle ne permette pas de capturer les effets de courbure. [57]

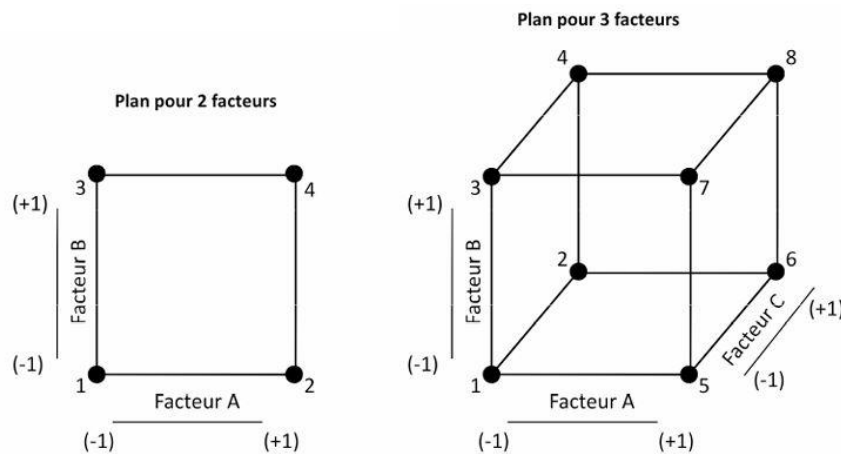


Figure II. 6: Plans factoriels complets 2^2 et 2^3

II.2.3. Constitution du plan factoriel complet

➤ Matrice d'expérience

Une matrice d'expériences regroupe toutes les combinaisons possibles des niveaux haut et bas de chaque facteur d'entrée, notés +1 et -1. [57] Par exemple, une étude avec deux facteurs nécessite quatre essais. Plus le nombre de facteurs augmente, plus le nombre d'expériences croît rapidement : un plan 2^k avec 7 facteurs demande ainsi 128 essais. Pour limiter ces essais tout en analysant tous les facteurs, on utilise des plans factoriels fractionnaires à deux niveaux. Une matrice d'expériences peut être construite manuellement grâce à l'algorithme de Yates, qui suit un schéma d'alternance des valeurs. Les tableaux suivants illustrent ce principe pour les plans 2^2 et 2^3 .

Tableau II. 1: Matrice d'un plan 2²

Exp	X ₁	X ₂
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Tableau II. 2: Matrice d'un plan 2³

Exp	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

➤ **Modèle mathématique**

- Le modèle mathématique proposé suit une approche linéaire pour chaque facteur, établissant ainsi une relation de premier degré. L'équation suivante représente ce modèle en l'absence d'interactions entre les facteurs.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + e \tag{II.5}$$

Où :

- a₀ représente l'effet théorique.
- a_i représentent les effets principaux des différents facteurs.
- Le modèle d'interactions de second ordre permet d'analyser l'effet combiné de deux facteurs sur un phénomène donné. Ces interactions sont mesurées et exprimées à travers les coefficients I_{ij} dans l'équation

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum \sum_{i < j}^k I_{ij} x_i x_j + e \tag{II.6}$$

- L'équation représente le modèle complet intégrant **k** facteurs ainsi que l'ensemble de leurs interactions mutuelles.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum \sum_{i < j}^k I_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i < j < \dots < k}^k I_{ij \dots K} x_i x_j \dots x_k + e \tag{II.7}$$

➤ **Effets globaux et effets moyens**

Soit la matrice d'expérience avec réponses (y_i) pour un plan factoriel complet 2^2 pour deux facteurs désignés x_1 et x_2 .

Tableau II. 3:matrice d'expérience avec réponses pour un plan factoriel complet 2^2

EXP	X_1	X_2	Réponses y_i
1	-1	-1	Y_1
2	+1	-1	Y_2
3	-1	+1	Y_3
4	+1	+1	Y_4

Les effets principaux des facteurs ainsi que leurs interactions peuvent être quantifier :

- **Effets moyens d'un facteur** : Pour déterminer les effets moyens d'un facteur, on calcule les moyennes des réponses correspondant aux niveaux -1 et +1. Ces effets, appliqués au facteur x_1 , sont exprimés par les équations suivantes :

$$a_1^- = \frac{y_1 + y_3}{2} \quad (\text{II.8})$$

$$a_1^+ = \frac{y_2 + y_4}{2} \quad (\text{II.9})$$

De façon similaire, les effets moyens du facteur x_2 sont calculés et exprimés dans les équations suivantes.

$$a_2^- = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (\text{II.10})$$

$$a_2^+ = \frac{y_3 + y_4}{2} \quad (\text{II.11})$$

- **Effet global d'un facteur** : L'effet global d'un facteur correspond à la variation moyenne de la réponse lorsque ce facteur passe de son niveau bas à son niveau haut. Dans un plan factoriel équilibré à deux niveaux, l'effet estimé d'un facteur est déterminé par la différence moyenne des réponses entre ces deux niveaux, chaque niveau étant représenté par sa réponse moyenne. [61]

$$a_1 = \frac{a_1^- + a_1^+}{2} = \frac{-Y_1 + Y_2 - Y_3 + Y_4}{4} \quad (\text{II.12})$$

$$a_2 = \frac{a_2^- + a_2^+}{2} = \frac{-Y_1 - Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \quad (\text{II.13})$$

Dans un modèle polynômial, les coefficients des termes du premier degré représentent les effets des différents facteurs.

- **Réponse théorique** : Cette valeur correspond à la moyenne des réponses obtenues aux deux niveaux expérimentaux, -1 et +1.

$$a_0 = \frac{+Y_1+Y_2+Y_3+Y_4}{4} \quad (\text{II.14})$$

- **Effets des interactions** : Lors de l'évaluation de l'interaction entre les variables x_1, x_2, \dots, x_k , une nouvelle colonne est ajoutée à la matrice des effets, désignée par x_i, x_j, \dots, x_k . Cette colonne est obtenue en multipliant les valeurs correspondantes des colonnes des variables impliquées. Le calcul de l'effet moyen et de l'effet global de cette interaction s'effectue de la même manière que pour un effet de facteur unique. Le tableau illustre cette matrice, qui regroupe les effets principaux ainsi que les interactions dans un plan factoriel complet à deux facteurs.

Tableau II. 4:: Matrice d'expérience avec effets pour un plan factoriel complet 2²

Exp	Moyenne	x_1	x_2	x_1x_2	Réponse (y_i)
1	-1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	-1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	y_4
Effets a_i	a_0	a_1	a_2	I_{12}	

Ainsi, le coefficient I_{12} illustre la modification de l'influence de x_1 selon les modifications apportées à x_2 et inversement. De façon analogue, il montre aussi comment l'impact de x_2 fluctue en réaction à des ajustements du niveau de x_1 .

$$I_{12} = \frac{I_{12}^- + I_{12}^+}{2} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 - Y_4}{4} \quad (\text{II.15})$$

Ainsi, le modèle mathématique linéaire peut être formulé à travers l'équation.

$$y = a_0 + x_1a_1 + x_2a_2 + I_{12}x_1x_2 + e \quad (\text{II.16})$$

II.2.4. Régression linéaire et analyse du modèle

➤ Régression linéaire

Une fois le plan d'expériences établi, un système de n équations correspondant aux n essais peut être formulé, permettant ainsi de déterminer p inconnues représentant les p coefficients du modèle. Pour simplifier cette démarche, une notation matricielle est généralement adoptée. Cependant, une divergence est souvent observée entre les valeurs prédites par le modèle et celles obtenues expérimentalement. Cet écart, connu sous le nom d'écart de modélisation, est représenté par le vecteur a .

$$y = Xa + e \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{p1} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{p1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{p1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Où :

- y : représente le vecteur des réponses mesurées dans l'expérience.
- X : design la matrice associée au modèle, élaborée à partir des points expérimentaux et du modèle préétabli.
- a : représente le vecteur des coefficients du modèle.
- e : représente les écarts entre les réponses réelles et les prédictions du modèle.

Dans cette situation, le système ne peut pas être résolu directement, car le nombre d'équations n est généralement inférieur au nombre d'inconnues p_n . Pour remédier à cette difficulté, une approche de régression, généralement basée sur la méthode des moindres carrés, est utilisée afin d'estimer les coefficients regroupés dans le vecteur \hat{a} .

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} (X^t) (Y) \quad (\text{II.19})$$

Où X^t est la transposée de la matrice X .

Différents logiciels permettent de calculer directement les coefficients, simplifiant ainsi cette tâche .

➤ **Test de validation du modèle**

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique utilisée pour évaluer l'impact des facteurs sur une variable de réponse. Elle repose sur la comparaison entre la variation attribuable à un facteur lorsqu'il est intégré dans le modèle et la variance résiduelle. Si le facteur est omis, son effet est absorbé par cette variance résiduelle. En examinant ces variations, il est possible de déterminer si le facteur exerce une influence significative. L'ANOVA est particulièrement utile lorsqu'il s'agit de comparer plusieurs échantillons afin d'identifier d'éventuelles différences significatives entre leurs moyennes. Elle s'appuie notamment sur le test F de Fisher-Snedecor, qui permet d'évaluer la significativité globale du modèle, bien qu'il ne renseigne pas sur l'importance individuelle de chaque coefficient.

Ainsi, le test de Student est employé afin d'évaluer individuellement la significativité de chaque coefficient [60]

Cette démarche nécessite la validation des hypothèses suivantes :

$$H_0: a_1 = \dots = a_p = 0 \quad (\text{II.20})$$

H_1 : Il existe au moins un $a_i \neq 0$.

La variance totale de la variable expliquée se répartit en deux éléments : la portion attribuée au modèle et celle correspondant à la variance résiduelle.

- Somme Totale des Carrés des Écarts (STCE) : est définie comme la somme de tous les carrés des écarts, après correction, pour y .

$$STCE = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{moy})^2 = SCEL + SCER \quad (\text{II.21})$$

- Somme des Carrés des Écarts dus à la Liaison (SCEL) : Ceci désigne la somme accumulée des écarts au carré résultant de la liaison, tels qu'expliqués par le modèle.

$$SCEL = \sum_{i=1}^n (y_i^{est} - y_{moy})^2 \quad (\text{II.22})$$

- Somme des Carrés des Écarts des Résidus (SCER) : Elle représente la somme globale des différences au carré de tous les résidus.

$$SCER = \sum_{i=1}^n \hat{e}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{est})^2 \quad (\text{II.23})$$

En tenant compte de ces notations :

- y_i Représente les valeurs de réponse réellement observées lors de l'exécution des expériences.
- y_{moy} est la valeur moyenne de ces réponses observées.
- Y_i^{est} désigne les valeurs de réponse prédites ou estimées en utilisant le modèle en question.

La variance moyenne de chaque composant du modèle est déterminée de la manière suivante : le Carré Moyen pour la Liaison (CML) reflète la variance expliquée par le modèle, tandis que le Carré Moyen pour les Résidus (CMR) et le Carré Moyen Total (CMT) évaluent la variance attribuable aux erreurs ou à l'imprécision du modèle. Ces valeurs sont calculées en divisant les sommes des carrés correspondantes (CML, CMR et CMT) par leurs degrés de liberté respectifs, ce qui permet de normaliser la somme des carrés en fonction du nombre d'observations ou de paramètres du modèle.

SCEL possède $p - 1$ degrés de liberté où "p" est le nombre de coefficients estimés dans le modèle. Cela signifie que si le modèle a, par exemple, 6 coefficients, la SCEL aura 5 degrés de liberté.

- SCER possède $n-p$ degrés de liberté où "n" représente le nombre total d'expériences réalisées. Donc, si 50 expériences sont réalisées et le modèle à 6 coefficients, la SCER aurait 44 degrés de liberté.

- STCE possède $n-1$ degré de liberté. avec "n" étant le nombre d'expériences. Ainsi si 50 expériences sont réalisées, la STCE aurait 49 degrés de liberté. Le format standard d'un tableau d'analyse de variance (ANOVA) est organisé comme suit:

Tableau II. 5:Tableau d'ANOVA

Variation due à	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F
Liaison	SCEL	P-1	$\frac{SCEL}{P-1} = CML$	$F_{cal} = \frac{CML}{CMR}$
Résidus	SCER	n-p	$\frac{SCER}{n-p} = CMR$	
Totale	STCE	N-1	$\frac{STCE}{n-1} = CMT$	

Le test F est utilisé pour évaluer la significativité statistique dans l'analyse de la variance, en suivant ces étapes :

- Calcul du F observé (F_{cal}) : Ce calcul est réalisé dans le tableau d'ANOVA, en comparant la variance expliquée par le modèle avec la variance résiduelle (erreur).
- Lecture du F critique (F_{crit}) : On détermine cette valeur à partir du Tableau de Fisher Snedecor en utilisant les degrés de liberté. Les degrés de liberté du numérateur sont $ddl1=p-1$ et ceux du dénominateur sont $ddl2=n-p$ où p est le nombre de coefficients estimés et n le nombre total d'expériences.
- Fixation du niveau de risque α : Le seuil α est choisi à l'avance, souvent à 0,05 ou 0,01, représentant la probabilité acceptable d'erreur de Type I (rejet à tort de l'hypothèse nulle).
- Comparaison de F_{cal} avec F_{crit} : L'hypothèse nulle (H_0), qui stipule généralement qu'il n'y a pas de différence significative ou aucun effet du modèle, est rejetée si $F_{cal} > F_{crit}$. L'acceptation ou le rejet de l'hypothèse nulle (H_0) dans une analyse de la variance (ANOVA) a des implications significatives pour l'interprétation des résultats
Accepter H_0 : Conclure qu'il n'existe pas de relation globale significative entre les variables indépendantes x_i et la variable dépendante y . Cela peut être dû à plusieurs raisons :
 - Modèle Inadéquat : Le modèle statistique utilisé pourrait ne pas être approprié pour capturer la relation entre les variables. Cela peut être dû à un mauvais choix de variables, à une mauvaise spécification du modèle, ou à l'absence de certaines variables importantes.
 - Peu ou Pas d'Influence des x_i sur y : Il est possible que les variations dans les variables indépendantes x_i n'aient qu'une influence mineure ou aucune influence sur la variable dépendante y . Cela indique que d'autres facteurs, non inclus dans le modèle, pourraient être responsables de la variation observée dans y .

Rejeter H_0 : Cette conclusion implique qu'il existe une relation significative entre les variations des variables indépendantes x_i et la variation de la variable dépendante

y . Cela signifie que les changements dans x_i sont statistiquement associés à des changements dans y , indiquant que le modèle est capable de capturer une part significative de la relation entre ces variables.

Autrement dit :

- Si $F_{cal} > F_{crit}$, alors le modèle de régression linéaire est considéré comme valide. Cela signifie que les variables indépendantes incluses dans le modèle ont un effet significatif sur la variable dépendante.
- En revanche, cela suggère que le modèle n'explique

pas de manière significative la variation dans les données et que les variables indépendantes ne sont pas utiles pour prédire la variable dépendante.

II.2.5. Logiciels de plans d'expériences

L'élaboration de plans d'expériences peut sembler simple, notamment lorsqu'on dispose de matrices préexistantes. Cependant, il est essentiel que le plan soit spécifiquement conçu pour répondre aux objectifs de l'étude, plutôt que d'adapter l'étude à des plans déjà établis. Dans certains cas, il devient nécessaire de créer un plan sur mesure pour obtenir des résultats à la fois pertinents et significatifs.

Les logiciels spécialisés dans la conception de plans d'expériences offrent heureusement des bibliothèques de plans classiques, adaptés à de nombreuses situations. En outre, ces outils permettent la création de plans personnalisés, parfaitement ajustés aux besoins particuliers de chaque étude. Cette flexibilité garantit aux chercheurs la possibilité de concevoir des plans optimisés, prenant en compte les paramètres spécifiques de leur étude et leurs contraintes expérimentales, ce qui se traduit par une meilleure qualité des données et des conclusions plus fiables.

Bien que l'estimation des coefficients puisse être effectuée à l'aide d'un tableur, cela implique des compétences en programmation et un investissement de temps considérable. Il est donc plus judicieux d'opter pour un logiciel spécialisé, qui non seulement calcule les coefficients, mais réalise également les analyses statistiques nécessaires pour évaluer la qualité du modèle mathématique.

Les logiciels dédiés à l'analyse de régression, tels que JMP, Minitab, Statistica, Statgraphics, Unscrambler, Pirouette, Modde, StatsModels, et scikit-learn, simplifient largement l'estimation des coefficients et l'évaluation du modèle. Ces outils fournissent des résultats statistiques détaillés, tels que les valeurs p , les R^2 , les intervalles de confiance, les tests de significativité des coefficients et les diagnostics des résidus, permettant aux chercheurs de mieux comprendre la robustesse de leur modèle.

L'utilisation de logiciels spécialisés permet aux chercheurs de gagner du temps, d'éviter les erreurs potentielles de programmation et d'accéder à une gamme complète d'outils statistiques pour une analyse approfondie des données de régression. Cela est indispensable pour prendre des décisions éclairées fondées sur les résultats du modèle.

Conclusion

Ce chapitre présente les concepts clés de la Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE). Il aborde d'abord les types de variables utilisées dans cette approche, en définissant le domaine d'étude, qui inclut les valeurs des variables d'intérêt et les éventuelles contraintes sur ces variables. La deuxième partie se concentre sur la modélisation, en explorant les techniques mathématiques qui permettent de relier les variations des réponses aux variations des facteurs. La modélisation est essentielle en MPE car elle permet de comprendre les effets des variables d'entrée sur les variables de sortie et d'établir des relations mathématiques entre elles.

Les Plans d'Expériences (PE) sont des outils utilisés pour organiser les campagnes expérimentales, avec pour objectif de fournir des résultats clairs et interprétables. Ils visent à créer un modèle exploratoire du domaine expérimental, servant de base à la stratégie expérimentale. Plusieurs types de modèles existent pour répondre aux besoins spécifiques des expérimentateurs. Lorsqu'ils sont utilisés correctement, les PE présentent plusieurs avantages, tels qu'une réduction des délais, des coûts plus faibles, une meilleure précision des résultats et une plus grande fiabilité des conclusions.

La procédure optimale pour mener une expérimentation peut être résumée en trois étapes principales :

1. Choix de la méthode expérimentale appropriée.
2. Évaluation des résultats obtenus.
3. Progression dans l'acquisition des résultats au fil du temps

Chapitre III

III. Résultats et discussions

Introduction

Cette étude s'appuie à la fois sur des méthodes expérimentales et des simulations numériques pour analyser en profondeur les mécanismes de transfert thermique entre l'outil et la pièce au cours du procédé de soudage. Trois zones d'interaction principales, jouant un rôle déterminant dans la génération et la transmission du flux de chaleur, ont été identifiées et modélisées : l'épaulement de l'outil, la surface latérale de la broche et sa surface inférieure.

Dans ce chapitre, un modèle thermique a été développé afin de simuler le comportement du flux de chaleur entre l'outil de soudage et les tôles à assembler. L'approche adoptée tient compte de l'apport de chaleur provenant de chacune des trois zones actives de l'outil :

i) **L'épaulement de l'outil** : cette partie, en contact direct avec la surface des tôles, est responsable d'une part importante de la génération de chaleur par frottement. Elle joue un rôle essentiel dans la plastification du matériau en surface.

ii) **La surface latérale de la broche** : en pénétrant dans la matière, la broche crée un frottement qui génère de la chaleur en profondeur, contribuant à l'adoucissement et au brassage du matériau dans la zone affectée thermiquement.

iii) **La surface inférieure de la broche** : bien que souvent négligée, cette surface participe également au transfert thermique, notamment dans les configurations où la broche traverse complètement l'épaisseur de la tôle.

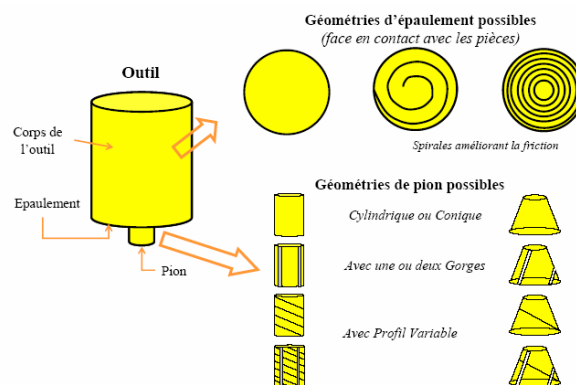


Figure III. 1: Géométries d'épaulement

L'outil de soudage utilisé dans ce travail, illustré à la Figure présente une configuration typique du procédé FSW, composée d'un épaulement de 14 mm de diamètre et d'un pion cylindrique fileté de 6 mm de diamètre et de 4 mm de hauteur. Cette géométrie a été choisie pour favoriser

une bonne génération de chaleur par frottement au niveau de l'épaulement, ainsi qu'un malaxage efficace du matériau dans la zone de joint grâce au filetage du pion.

Comme le montre la figure, différentes géométries d'épaulement peuvent être utilisées pour améliorer la friction, notamment l'ajout de spirales, qui facilitent l'écoulement du matériau vers l'axe du joint. De même, la forme du pion peut être adaptée selon les besoins : cylindrique, conique, avec une ou plusieurs gorges, ou encore à profil variable, afin d'optimiser le brassage du matériau et la microstructure finale du joint soudé.

III.1. Étude expérimentale

Dans le cadre de travaux pratiques du PFE réalisés à l'Université de Belhadj Bouchaib Aïn Témouchent, une étude expérimentale a été menée sur le soudage du polyéthylène haute densité (PEHD) à l'aide de la méthode de soudage par friction-malaxage (FSW - Friction Stir Welding). Ce procédé, initialement développé pour les métaux, est de plus en plus étudié pour le soudage des polymères, en raison de ses avantages tels que l'absence de fusion, une faible consommation d'énergie, et une meilleure qualité des soudures.

Les essais ont été réalisés à l'aide d'une machine de fraisage WBM20 pour permettre la mise en œuvre du procédé FSW sur des plaques en PEHD. Au total, huit essais ont été effectués, avec des variations de certains paramètres comme la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance, ou encore l'angle.

Lors de chaque essai, des mesures de température ont été prises à l'aide d'un pyromètre, afin de suivre l'évolution thermique pendant le soudage. Ces mesures sont essentielles pour comprendre l'influence de la température sur la qualité de la soudure.











Figure III. 2:Expérience

Dans le cadre de notre expérience, huit essais ont été réalisés en faisant varier les paramètres de soudage. Pour chaque essai, la température a été mesurée en différents points spécifiques. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau III. 1 : résultat de l'expérience

Test	N (tr/min)	a(mm/min)	$\alpha(^{\circ})$	T($^{\circ}$ C)
1	1840	10	5	87,8
2	2060	10	5	89,06
3	1840	15	5	87,03
4	2060	15	5	87,3
5	1840	10	7	85,63
6	2060	10	7	88,9
7	1840	15	7	83,6
8	2060	15	7	85,93

Tableau III. 2. Joint de soudeur

Essais	1	2	3	4
Zone				
	5	6	7	8
				

Afin de faciliter les calculs, on adopte un système de codage dans lequel la valeur maximale est fixée à 1 et la valeur minimale à -1. Le tableau devient comme suivant :

Tableau III. 3.Valeurs des paramètres codés

exp	N(tr/min)	a(mm/min)	$\alpha(^{\circ})$	T($^{\circ}$ C)
1	-1	-1	-1	87,8
2	+1	-1	-1	89,06
3	-1	+1	-1	87,03
4	+1	+1	-1	87,3
5	-1	-1	+1	85,63
6	+1	-1	+1	88,9
7	-1	+1	+1	83,6
8	+1	+1	+1	85,93

III.1.1. Calcule des effets des facteurs et d'interaction

Les coefficients du modèle sont déterminés à partir de l'expression suivante :

$$\text{Coefficients} = (X^t \cdot X)^{-1} \cdot X^t \cdot Y \quad (\text{III.1})$$

Formule globale du modèle mathématique :

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum \sum_{i < j}^k I_{ij} x_i x_j + e \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas de trois facteurs le modèle mathématique devient :

$$y_i = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + I_{12} x_1 x_2 + I_{13} x_1 x_3 + I_{23} x_2 x_3 + e \quad (\text{III.3})$$

D'une façon matricielle :

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 \\ 1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 \\ 1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ 1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ 1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ 1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ 1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ I_{12} \\ I_{13} \\ I_{23} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \end{pmatrix}$$

Tableau III. 4. Valeurs de coefficients de chaque facteurs et interactions

Facteurs	Moyenne	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	L'angle (°)	Interaction Vitesse de rotation /vitesse d'avance	Interaction vitesse De rotation / L'angle	Interaction vitesse d'avance /l'angle
Coef	A0	A1	A2	A3	I12	I13	I23
Valeurs	86,90625	0,89125	-0,94125	-0,89125	-0,24125	0,50875	-0,30875

Tableau III. 5. Tableau globale des facteurs et les interactions

exp	moy	N	a	α	I12	I13	I23	T°c exp	T°C the	ECART TYPE
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	87,8	87,80625	0,00625
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	89,06	89,05375	0,00625
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	87,03	87,02375	0,00625
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	87,3	87,30625	0,00625
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	85,63	85,62375	0,00625
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	88,9	88,90625	0,00625
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	83,6	83,60625	0,00625
8	1	1	1	1	1	1	1	85,93	85,92375	0,00625

III.2. Validation de model

III.2.1. Test de Fisher

L'analyse de variance (ANOVA, pour ANALYSIS OF VARIANCE) est un test statistique permettant de comparer des séries de données quantitatives en examinant leurs variances. Elle sert à évaluer globalement les différences entre trois groupes ou plus à l'aide d'un test unique de Fisher-Snedecor. L'ANOVA est un test paramétrique, applicable lorsque les données suivent une distribution normale et présentent des variances homogènes. Dans cet article, nous nous concentrerons exclusivement sur le cas de l'analyse de variance à un facteur.

➤ Variation due à résidus (SCER)

$$SCER = \sum_{i=1}^n \hat{e}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{est})^2$$

$$SCER = (87,80625 - 87,8)^2 + (89,05375 - 89,06)^2 + (87,02375 - 87,03)^2 \\ + (87,30625 - 87,3)^2 + (85,62376 - 85,63)^2 + (88,90625 - 88,9)^2 \\ + (83,60625 - 83,6)^2 + (85,92375 - 85,93)^2$$

$$SCER = 0,000313$$

➤ **Variation due à la liaison (SCEL)**

$$SCEL = \sum_{i=1}^n (y_i^{est} - y_{moy})^2$$

$$SCEL = (87,80625 - 86,90625)^2 + (89,05375 - 86,90625)^2 \\ + (87,02375 - 86,90625)^2 + (87,30625 - 86,90625)^2 \\ + (85,62376 - 86,90625)^2 + (88,90625 - 86,90625)^2 \\ + (83,60625 - 86,90625)^2 + (85,92375 - 86,90625)^2$$

$$SCEL=23,09568$$

➤ **Variation due a la totale**

$$STCE = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{moy})^2 = SCEL + SCER$$

$$STCE = 23,09568 + 0,000313$$

$$STCE = 23,09599$$

Tableau III. 6. Tableau ANOVA

Variation due a	Somme des carré	DDL	Carré moyen	Fcalc
Liaison	SCEL= 23,09568	P-1 =6	MCF =SCEL/(p-1) =3,8492	MCF/MCR =12297,76
Résidus	SCER= 0,000313	n-p =1	MCR =SCER/(n-p) =0,000313	
Totale	STCE= 23,09599	n-1 =7		

L'analyse comparative entre la Fcal et Fcrit révèle que la première est nettement supérieure a la seconde Fcal>>Fcrit ; cette différence significative témoigne de la fiabilité du modèle, en assurant une marge de sécurité considérable, des lors, il est raisonnable d'affirmer que le modèle étudié répond favorablement aux critères de validité exigés.

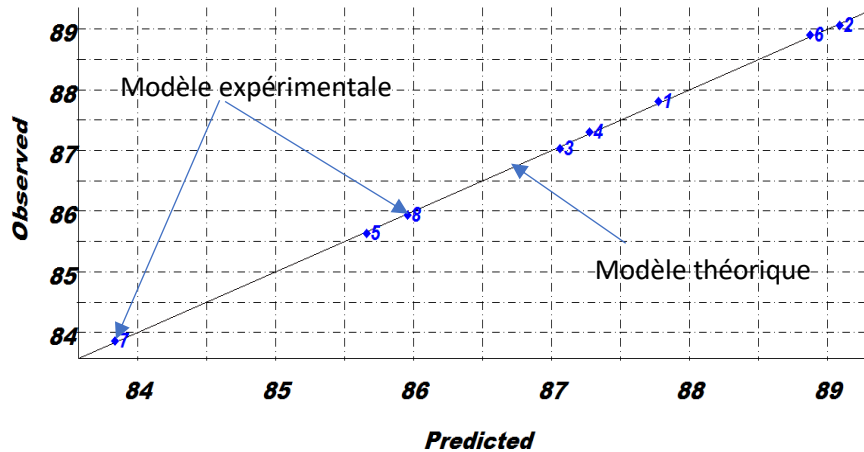


Figure III. 3:Schéma thermique des deux modèles (expérimental et théorique)

La figure illustre une bonne concordance entre les données expérimentales (points bleus) et les valeurs théoriques (ligne noire), montrant la fiabilité du modèle. Les points sont proches de la ligne, indiquant une forte corrélation et une faible erreur entre les prédictions et les observations.

III.2.2. Test de student

Le test de Student est un test paramétrique utilisé pour comparer la moyenne observée d'un échantillon à une valeur de référence, ou encore pour confronter une probabilité empirique à une probabilité théorique. Il permet également de comparer les moyennes de deux échantillons indépendants, ce que l'on désigne par un test de conformité. Ce test tire son nom de la loi de Student, à partir de laquelle sont déterminés les écarts critiques nécessaires à l'interprétation des résultats.

Calcul de la variance S^2 :

$$S^2 = \frac{\sum_{n=1}^8 (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p)} \quad S^2 = \frac{0,0025}{1} \quad S^2=0,0025$$

Calcul de la variance S_0 :

$$S_0 = S_N = S_\alpha = S_\alpha = S_{Na} = S_{N\alpha} = S_{a\alpha}$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{S^2}{n}} = \sqrt{\frac{0,0025}{8}} = 0,017678$$

Calcul de tcrit :

$$t_{crit} = S_0 \times \beta \quad t_{crit} = 0,017678 \times 12,71 \quad t_{crit} = 0,224683$$

➤ **Test des effets des facteurs**

Ce test a été réalisé conformément à la loi de Student, également connue sous le nom de test t de Student, afin d'évaluer la significativité statistique des différences observées.

H0 : l'effet a_i est nul c à d a_i n'est pas significatif

H1 : l'effet a_i n'est pas nul c à d a_i est significatif

✓ Si $|t_i| > t_{crit}$ l'hypothèse H0 est rejetée (H1 est acceptée)

⇒ a_i Est significatif

✓ Si $|t_i| \leq t_{crit}$ l'hypothèse H0 acceptée (H1 est rejetée)

⇒ a_i N'est pas significatif

➤ **Effet des facteurs principaux**

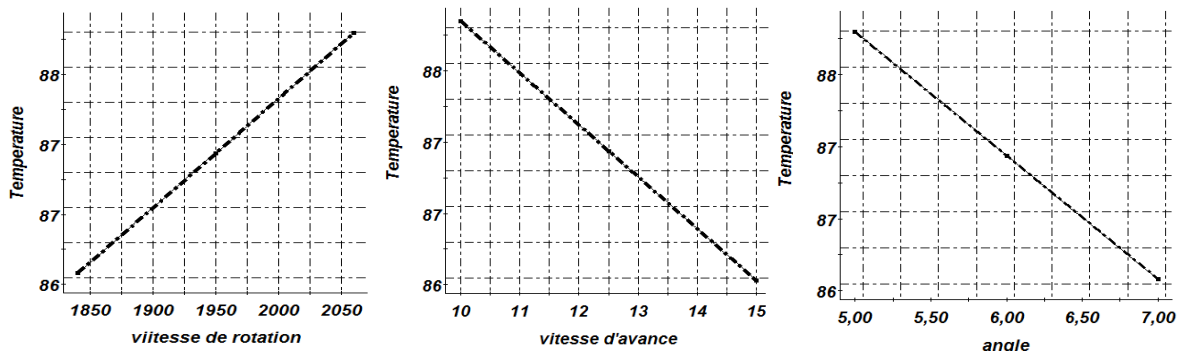


Figure III. 4: effet des facteurs principaux

Les courbes montrent que la température générée durant le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) est fortement influencée par les paramètres opératoires. Lorsque l'angle d'inclinaison de l'outil augmente (de 5° à 7°), la température diminue légèrement, ce qui peut être attribué à une réduction de la zone de contact entre l'outil et le matériau, diminuant ainsi le frottement. De même, une augmentation de la vitesse d'avance (de 10 à 15 mm/min) entraîne une baisse de la température, en raison d'un temps de contact plus court entre l'outil et le matériau, limitant l'accumulation de chaleur. En revanche, la température augmente de manière quasi linéaire avec la vitesse de rotation de l'outil (de 1840 à 2060 tr/min), ce qui est cohérent avec l'augmentation de la friction générée par une vitesse angulaire plus élevée.

➤ **Effets des interactions :**

Le graphique ci-dessous illustre les effets des interactions principales sur la variable étudiée :

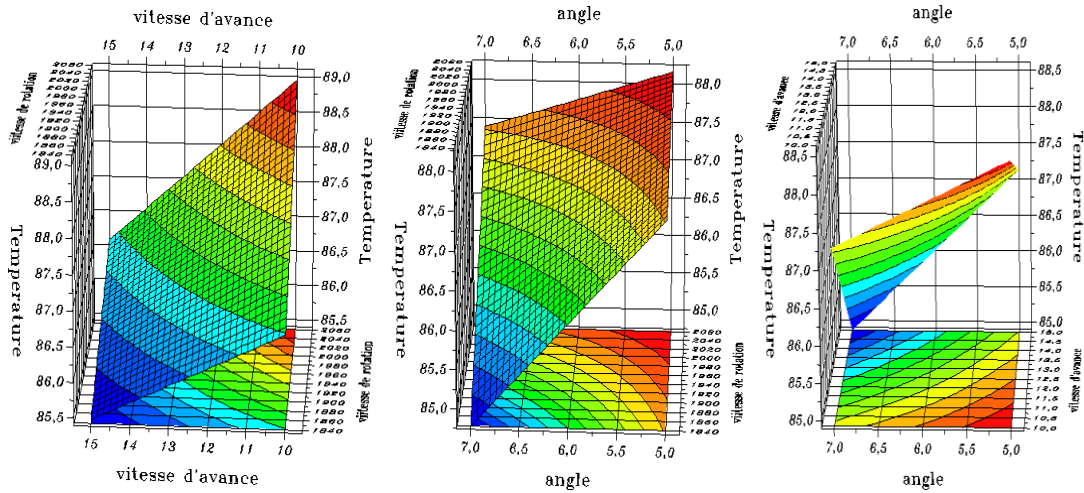


Figure III. 5: effet des interactions

Le premier graphique met en évidence une augmentation de la température en fonction de la vitesse de rotation, en particulier lorsque la vitesse d'avance est faible. À l'inverse, une vitesse d'avance plus élevée tend à réduire le dégagement de chaleur. Le deuxième graphique montre que l'angle de l'outil influence également l'échauffement : un angle faible accentue l'élévation de température due à la rotation, tandis qu'un angle plus important atténue cet effet. Quant au troisième graphique, il révèle une diminution de la température à mesure que la vitesse d'avance augmente, phénomène particulièrement marqué lorsque l'angle de l'outil est élevé.

Ces observations soulignent l'importance des interactions entre les différents paramètres de soudage. Ainsi, le contrôle efficace de la température ne peut être obtenu par l'ajustement d'un seul paramètre, mais nécessite une combinaison judicieuse de l'ensemble des conditions opératoires.

➤ Les iso courbe des figures 3D des interaction principaux

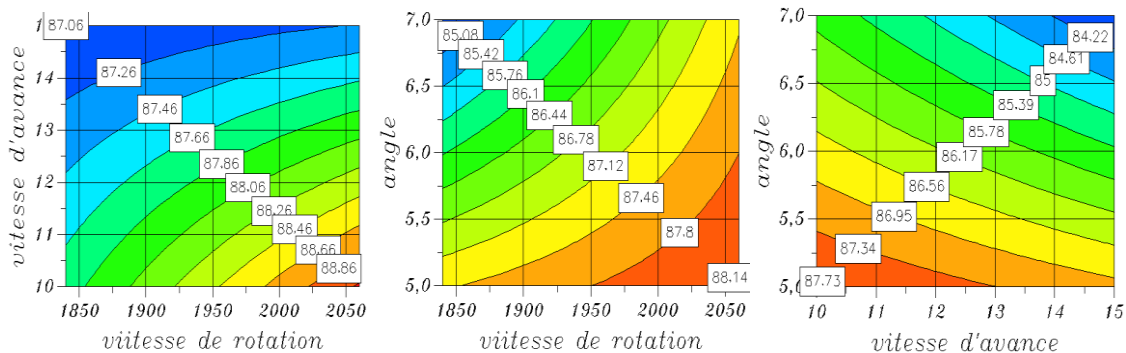


Figure III. 6: iso courbe des figures 3D

Les résultats présentés à travers les trois graphiques montrent une influence significative des paramètres de soudage sur les performances obtenues.

Vitesse d'avance vs vitesse de rotation : Les meilleures performances (88,26 à 88,86) sont obtenues avec une forte vitesse de rotation et une faible vitesse d'avance, tandis que les moins bonnes (87,06 à 87,46) apparaissent à faible vitesse de rotation et forte vitesse d'avance.

Angle vs vitesse de rotation : Les performances maximales (jusqu'à 88,14) sont atteintes avec une vitesse de rotation élevée et un angle faible, alors que les plus faibles (85,08 à 85,42) sont observées à faible vitesse de rotation et grand angle.

Angle vs vitesse d'avance : Les meilleures performances (87,13 à 87,34) sont obtenues avec un faible angle et une faible vitesse d'avance, tandis que les résultats les plus faibles (84,01 à 84,22) sont associés à un grand angle et une forte vitesse d'avance.

III.2.3. Intervalle de confiance des facteurs principaux

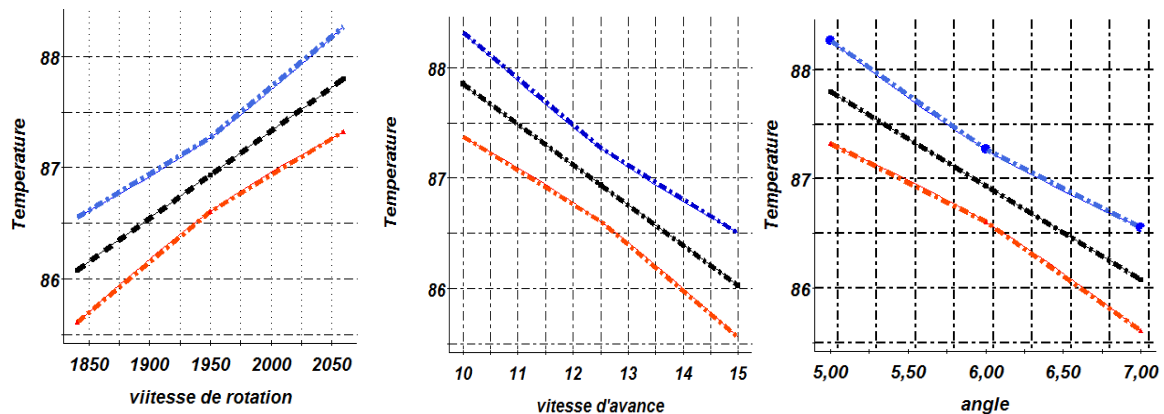


Figure III. 7: intervalle de confiance des facteurs principaux

Les graphes illustrent les intervalles de confiance des effets des facteurs principaux sur la température. Ces intervalles permettent d'évaluer la précision statistique des estimations. Pour chaque facteur (vitesse de rotation, vitesse d'avance, angle), les courbes sont entourées de bandes représentant l'intervalle de confiance, indiquant la plage probable dans laquelle se situe la véritable valeur moyenne de la température. Des intervalles étroits, comme observés pour la vitesse d'avance et l'angle, traduisent une meilleure précision des résultats et moins de variabilité. En revanche, des intervalles plus larges, notamment à haute vitesse de rotation, suggèrent une plus grande incertitude. Ces graphes permettent donc de juger de la fiabilité des effets mesurés et d'identifier les facteurs les plus influents avec un bon degré de confiance.

III.2.4. Exploitation de l'intelligence artificielle sur résultats

Sur la base de notre expérience expérimentale, les températures initiales et finales ont été mesurées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 7. Variation de température

Test	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	Angle α (°)	Température initiale °C	Température finale °C
1	1840	10	5	86,4	89,1
2	2060	10	5	86,5	91,2
3	1840	15	5	85,4	87,03
4	2060	15	5	83,9	89,7
5	1840	10	7	83,5	85,63
6	2060	10	7	88	88,9
7	1840	15	7	83,6	89,86
8	2060	15	7	85,4	85,93

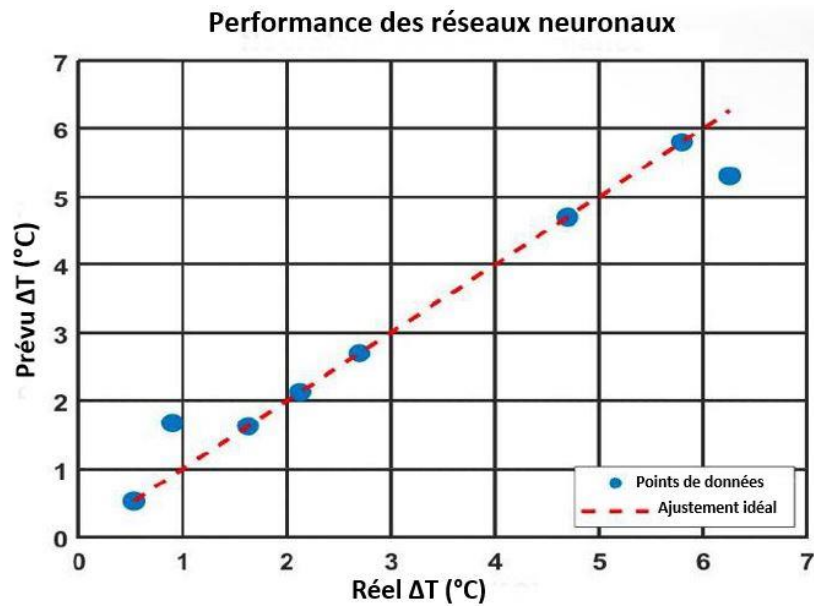


Figure III. 8:régression des prédit par ai

Grâce à l'intelligence artificielle, les prédictions de ΔT se sont avérées fiables dans six cas sur huit. Les deux écarts restants suggèrent la présence de pertes thermiques non négligeables.

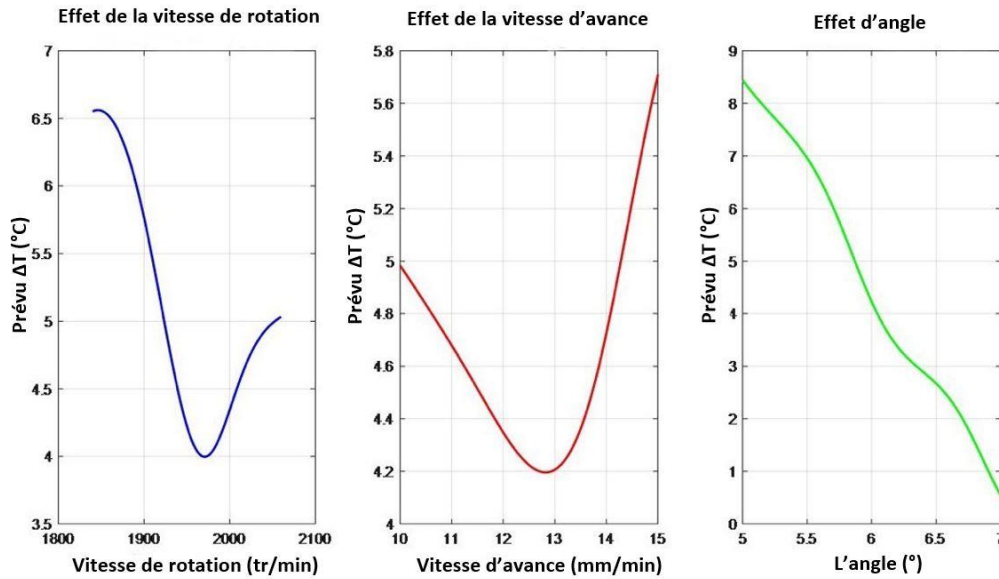


Figure III. 9: effets des paramètres principaux sur la variation de température au cours de l'opération de soudage

Dans le premier graphique, illustrant l'effet de la vitesse de rotation sur la variation de température (ΔT), on observe que lorsque la vitesse de rotation est faible, à 1800 tr/min, ΔT est élevée, atteignant environ 6,6 °C. En augmentant la vitesse à 1950 tr/min, ΔT diminue nettement pour atteindre un minimum d'environ 4,0 °C. Cependant, à 2100 tr/min, ΔT remonte légèrement à environ 5,0 °C, ce qui suggère qu'une vitesse de rotation trop élevée augmente de nouveau la variation thermique.

Le deuxième graphique montre l'effet de la vitesse d'avance : à une vitesse de 10 mm/min, ΔT est d'environ 5,0 °C. Lorsque la vitesse augmente à 13 mm/min, ΔT atteint un minimum d'environ 4,2 °C, puis remonte à environ 5,7 °C à 15 mm/min. Cela révèle que la variation thermique est la plus faible à une vitesse intermédiaire.

Enfin, dans le troisième graphique, représentant l'effet de l'angle d'inclinaison, on constate une diminution continue de ΔT avec l'augmentation de l'angle. À 5,5°, ΔT est très élevée, environ 8,5 °C, puis diminue à environ 5,5 °C pour un angle de 6°, et chute fortement à environ 0,5 °C lorsque l'angle atteint 7°. Cet angle semble avoir l'effet le plus marqué et linéaire sur la réduction de la variation thermique.

Conclusion

L'étude expérimentale menée dans ce chapitre a permis d'évaluer l'impact des principaux paramètres du soudage par friction-malaxage (FSW) — à savoir la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et l'angle d'inclinaison de l'outil — sur la qualité des joints réalisés sur des plaques en polyéthylène haute densité (PEHD). Grâce à l'utilisation d'un plan factoriel complet et à l'exploitation des outils statistiques (tests de Student, de Fisher, analyse de la variance), les effets individuels et les interactions entre facteurs ont été quantifiés avec précision. Les résultats montrent que certains paramètres ont une influence significative sur la température générée et, par conséquent, sur la résistance mécanique du joint soudé. De plus, l'intégration de l'intelligence artificielle a permis de modéliser la réponse thermique du procédé et de prédire avec une bonne précision les conditions optimales d'assemblage. Ainsi, ce chapitre confirme que le FSW est une méthode efficace pour souder le PEHD, à condition de bien maîtriser les paramètres opératoires. Les conclusions tirées ouvrent la voie à une amélioration du procédé et à une éventuelle industrialisation de cette technique pour des applications variées

Conclusion générale

Ce travail a porté sur l'étude du soudage par friction-malaxage (FSW) appliqué au polyéthylène haute densité (PEHD), à travers une démarche structurée en trois chapitres complémentaires.

Le premier chapitre a posé les bases théoriques en présentant d'une part les principes fondamentaux du soudage, notamment le FSW, et d'autre part les propriétés du PEHD. Ce matériau, largement utilisé dans l'industrie pour ses qualités mécaniques, chimiques et sa légèreté, présente toutefois une difficulté particulière à souder par des méthodes conventionnelles. Le recours au FSW, procédé sans fusion, s'avère ainsi pertinent pour préserver l'intégrité du matériau et garantir une bonne qualité d'assemblage.

Le deuxième chapitre a porté sur la méthode du plan d'expérience, outil essentiel pour optimiser les paramètres de soudage. Grâce à cette méthode, les facteurs influents tels que la vitesse de rotation, la vitesse d'avance ou encore la profondeur de pénétration ont été identifiés et étudiés de manière systématique. L'approche statistique a permis de concevoir une matrice d'expériences efficace, réduisant le nombre d'essais tout en assurant une analyse rigoureuse des interactions entre les paramètres.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude expérimentale proprement dite. Des essais de soudage ont été réalisés conformément au plan établi, suivis de tests mécaniques et d'observations visuelles pour évaluer la qualité des joints. Les résultats ont mis en évidence l'influence significative des paramètres du procédé sur la résistance mécanique des soudures. Par ailleurs, des outils d'analyse statistique comme l'ANOVA et le test de Student ont permis de valider la fiabilité des résultats et de dégager les conditions optimales de soudage du PEHD. en plus , L'utilisation de l'intelligence artificielle a facilité la modélisation de la réponse thermique du procédé, permettant ainsi de prédire avec une grande précision les conditions optimales d'assemblage."

En conclusion, cette étude a démontré l'efficacité du procédé FSW pour le soudage du PEHD, en s'appuyant sur une méthodologie rigoureuse alliant théorie, planification expérimentale et validation pratique. Elle constitue une base solide pour de futures recherches visant à industrialiser ce procédé dans le domaine des polymères.

Bibliographie

- [1] "The History of Welding. (2025, 18 mars). <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding>".
- [2] "Chan, P. (2014). Arc welding -an overview 1 .I History of welding. www.academia.edu".
- [3] "Espion, B. (2021). The emergence of electric arc welding in the construction and reinforcement of railway bridges in France, 1930s–1940s."
- [4] "Admin. (2023, 28 avril). History of Welding and Its Evolution over Time. Welding Of Welders. <https://weldingofwelders.com/history-of-welding>".
- [5] "Jacqmin, J. (2022). Emergence de la qualification professionnelle des soudeurs en France au XXe siècle. Université Libre de Bruxelles (ULB)".
- [6] "Threatt, A. K. (2025, 7 janvier). The History of Welding : From Ancient Forge to Modern Precision. Custom Precision Technologies."
- [7] "Robots.com. (n.d.). The evolution of robotic welding: A historical retrospective."
- [8] "International Agency for Research on Cancer (IARC). (2018). IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans: Welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide (Vol. 118)".
- [9] "Hargrave, G. (2024, 23 mai). History of welding : From ancient times to modern applications - WeldSmartly. Weldsmartly."
- [10] "Jeffus, L. (2016). Welding: Principles and applications (8th ed.). Cengage Learning."
- [11] "Pérez, M. (2024, 19 juillet). Guía Completa para Eliminar Escoria en Soldaduras : Técnicas y Consejos. Soldadoras Online"
- [12] "Premium Photo | Welder welding galvanized steel pipes with acetylene gas welding torch machine in construction site. (2023, 10 octobre)".
- [13] "Éditoriale, É. (2024, 24 septembre). Avantages et caractéristiques du soudage TIG."
- [14] "Kawat Las Maintenance Stainless Steel. EDZONA. Agen. (2024, 21 juin). Jual Kawat Las Besi Cor | Baja | Stainless Steel | Hardfacing | Aluminium | Tembaga | Argon."
- [15] "Boucher, M. (2016). Soudage et techniques associées. Dunod."
- [16] "Suarez, F. (2022b, janvier 25). ▷ Las mejores técnicas de soldadura - FERRO INDUSTRIAL. FERRO INDUSTRIAL."
- [17] "Thomas, W. M., Nicholas, E. D., & Needham, J. C. (1991). "Friction stir welding." International Patent Application No. PCT/GB92/02203."

Bibliographie

- [18] "Choudhury, P. R. P., & Bhat, S. S. (2006). Introduction to Welding and Joining Processes. Elsevier."
- [19] "Airco-Inside Dordrecht. (s. d.). Solderen & Soldeertechniek / Koudetechniek | Airco-Inside Dordrecht. <https://www.airco-inside.nl/koudetechniek-1/solderen-soldeertechniek>".
- [20] "The Welding Institute - New developments in the Friction Stir Welding of steel in air and underwater."
- [21] "A. K. Ghosh, et al., "Friction Stir Welding: A Review," Materials Science and Engineering A, 2013."
- [22] "N. C. B. M. de Castro, et al., "Friction Stir Welding of Aluminium Alloys," Welding Journal, 2003."
- [23] "Benyounis, A., Boujelbene, M., & Bouaziz, M. (s.d.). Modélisation numérique du procédé de soudage par friction-malaxage".
- [24] "Mishra, R. S., & Ma, Z. (2005). Friction Stir Welding and Processing. Materials Science and Engineering: R: Reports, 50(1-2), 1-78."
- [25] "Mathilda. (2023, 14 février). Le soudage par friction malaxage optimisé. TRA-C Industrie."
- [26] "Thomas, W. M., & Nicholas, E. D. (1997). "Friction Stir Welding". International Patent Application No. PCT/GB97/02203."
- [27] "Ravikumar, K. N. S., & Babu, S. S. (2016). Friction stir welding: From basics to applications. Springer."
- [28] "Yahi, A., & Makhlouf, B. (2020). Titre du mémoire (Mémoire de master, Université de Médéa)."
- [29] "Shane. (2024, août 16). Soudage bout à bout : Guide complet des méthodes et techniques | MachineMFG. MachineMfg."
- [30] "Bernaldo, A. (2023, 11 décembre). Différents types de soudures et de joints en soudage. Arccaptain"
- [31] "American Welding Society. (2004). Welding handbook (9th ed.). American Welding Society."
- [32] "Harper, C. A. (2015). Introduction to welding engineering. CRC Press."
- [33] "Smaili, L., & Keddous, M. (2022). Conception et dimensionnement d'une machine de soudage par le procédé FSW (Mémoire de projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique)".
- [34] "Mishra, R.S., and Ma, Z.Y., "Friction Stir Welding and Processing," Materials Science and Engineering: R: Reports, vol. 50, no. 1–2, pp. 1-78, 2005."
- [35] "Nandan, R., DebRoy, T., and Bhadeshia, H.K.D.H., "Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties," Progress in Materials Science, vol. 53, no. 6, pp. 980-1023, 2008."

Bibliographie

- [36] "Elangovan, K., Balasubramanian, V., and Babu, S., "Predicting tensile strength of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model," *Materials & Design*, vol. 30, no. 1, pp. 188-193, 2009".
- [37] "Andrady, A. L. (2003). *Plastics and the Environment*. Wiley."
- [38] "Urbanski, T. (1965). *Chemistry and Technology of Explosives Vol. 1*".
- [39] "Heller, C. (2003). *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology*".
- [40] "Science History Institute – “Leo Baekeland and the Invention of Bakelite”".
- [41] "NobelPrize.org – The Nobel Prize in Chemistry 1953 – Hermann Staudinger".
- [42] "Yarsley, V. E. & Couzens, E. G. (1941). *Plastics*. Penguin Books."
- [43] "NobelPrize.org – Ziegler and Natta: Polymerization catalysts".
- [44] "Heeger, A. J., et al. (2001). *Conductive Polymers and Their Applications*. *Reviews of Modern Physics*, 73(3), 681–700."
- [45] "Dolatkhani, D. (2022, 6 octobre). Qu'est-ce qu'un polymère ? *PolymerExpert*".
- [46] "Vagner, C., Cochez, M., Vahabi, H., & Ferriol, M. (2016, 10 juillet). *Chimie de la combustion des polymères et ignifugation*. *Techniques de L'Ingénieur*".
- [47] "Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). Wiley."
- [48] "Brydson, J. A. (1999). *Plastics Materials* (7th ed.). Butterworth-Heinemann."
- [49] "Mark, J. E. (2007). *Physical Properties of Polymers Handbook* (2nd ed.). Springer."
- [50] "Fried, J. R. (2003). *Polymer Science and Technology* (2nd ed.). Prentice Hall".
- [51] "Rosen, S. L. (1993). *Fundamental Principles of Polymeric Materials* (2nd ed.). Wiley-Interscience."
- [52] "Université Mohamed Khider Biskra. (2013). *Chapitre 1 : Généralités sur les polymères*. Mémoire de Master."
- [53] "Chimie et Physico-Chimie des Polymères. (2021). *Classification des polymères*. Cairn Info – Sciences Techniques Médicales."
- [54] "Radical. (2025, 22 mars). PEHD recyclé - Pont Europe. Pont Packaging."
- [55] "Rice, L. (2024, 15 novembre). *What Are the Main Properties of HDPE (High-Density Polyethylene) ? Legacy HDPE Boats*".
- [56] "Goupy, J., *Plans d'expériences2006*: Ed. Techniques Ingénieur".
- [57] "DAAS, M.S., *Plans d'expériences*".

Bibliographie

- [58] "Rouxel, H. (2017, 9 septembre). Introduction aux plans d'expériences."
- [59] "Jacques GOUPY, "Les plans d'expériences", 2006."
- [60] "Wahdame, B., Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences, 2006, Université de FrancheComté; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard."
- [61] "Mezrag, B., Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT, 2015, Université Montpellier; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algé)".

