

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت - بلحاج بوشعيب

Université Ain Témouchent– Belhadj Bouchaib



Faculté des sciences et de Technologie
Département de Genie mécanique

Projet de Fin d'étude

Pour obtenir le **diplôme de Master**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Thème :

Étude expérimentale et numérique de la réparation des polymères fissurés par friction malaxage

Presenté par:

- 1. SI-ABDELKADER Abdelkader**
- 2. BENCHOHRA Fatima Zahra**

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade et établissement</i>	<i>EN Qualité de</i>
<i>SERIER Mohamed</i>	<i>Pr. UBB AIN TEMOCHENT</i>	<i>Encadreur</i>
<i>CHAMA Mourad</i>	<i>Dr. UBB AIN TEMOCHENT</i>	<i>Président</i>
<i>SALAH Hichem</i>	<i>Dr. UBB AIN TEMOCHENT</i>	<i>Examineur</i>

Année Universitaire : 2025/2026

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 2026, 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.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la réparation des structures polymères endommagées par fissuration, en proposant le soudage par friction-malaxage (FSW) comme alternative innovante aux procédés conventionnels par fusion. Après une revue bibliographique consacrée aux propriétés du polyéthylène haute densité (PEHD), aux mécanismes de fissuration des polymères semi-cristallins et aux limites des techniques de soudage classiques, l'étude s'appuie sur la méthodologie des plans d'expériences (MPE) pour quantifier l'influence des paramètres opératoires du procédé FSW vitesse de rotation, vitesse d'avance et angle d'inclinaison de l'outil sur la température maximale développée dans la zone soudée. Un plan factoriel complet a permis d'établir un modèle de régression prédictif, complété par une approche d'intelligence artificielle reposant sur un réseau de neurones artificiels (ANN), afin d'affiner la modélisation de la réponse thermique. Les résultats obtenus confirment que le procédé se déroule entièrement à l'état solide, en deçà du point de fusion du PEHD, et mettent en évidence le rôle prépondérant de la vitesse de rotation et de son interaction avec l'angle d'inclinaison. Les conditions opératoires optimales identifiées ouvrent des perspectives prometteuses pour l'application du FSW à la réparation industrielle des composants en polymère thermoplastique, tout en soulignant la nécessité d'essais complémentaires pour consolider la robustesse statistique du modèle proposé.

mots-clés: Polyéthylène haute densité (PEHD) ; Soudage par friction-malaxage (FSW) ; Réparation des polymères ; Plans d'expériences (DOE) ; Réseau de neurones artificiels (ANN) ; Optimisation thermique

Abstract

This work falls within the scope of repairing polymer structures damaged by cracking, proposing Friction Stir Welding (FSW) as an innovative alternative to conventional fusion welding processes. Following a literature review dedicated to the properties of High-Density Polyethylene (HDPE), the cracking mechanisms of semi-crystalline polymers, and the limitations of classic welding techniques, the study utilizes the Response Surface Methodology (RSM) / Design of Experiments (DoE) to quantify the influence of the FSW operating parameters—rotational speed, traverse speed, and tool tilt angle—on the maximum temperature developed within the weld zone. A full factorial design was employed to establish a predictive regression model, complemented by an artificial intelligence approach based on an Artificial Neural Network (ANN) to refine the thermal response modeling. The obtained results confirm that the process takes place entirely in a steady visco-plastic state, below the crystalline melting point of HDPE, and highlight the predominant role of the rotational speed and its interaction with the tilt angle. The identified operating conditions open promising perspectives for the industrial application of FSW in repairing thermoplastic polymer components, while emphasizing the need for additional testing to consolidate the statistical robustness of the proposed model.

Keywords: High-Density Polyethylene (HDPE); Friction Stir Welding (FSW); Polymer repair; Design of Experiments (DoE); Artificial Neural Network (ANN); Thermal optimization.

ملخص

يندرج هذا العمل في إطار إصلاح الهياكل البوليمرية المتضررة من التصدع، حيث يقترح اللحام بالاحتكاك والخلط (FSW) كبديل مبتكر لعمليات اللحام التقليدية بالصهر. بعد مراجعة مرجعية مخصصة لخصائص البولي إيثيلين عالي الكثافة (PEHD)، وآليات تصدع البوليمرات شبه البلورية، وحدود تقنيات اللحام الكلاسيكية، تعتمد هذه الدراسة على منهجية تصميم التجارب (DoE) لتقييم وقياس تأثير معالم التشغيل لعملية اللحام بالاحتكاك والخلط — وهي سرعة الدوران، وسرعة التقدم، وزاوية ميل الأداة — على درجة الحرارة القصوى المتولدة في منطقة اللحام. وقد أتاح تصميم عاملي كامل بناء نموذج انحدار تنبئي، تم استكمال به نهج يعتمد على الذكاء الاصطناعي بواسطة شبكة عصبية اصطناعية (ANN)، وذلك لتدقيق نمذجة الاستجابة الحرارية. وتؤكد النتائج التي تم الحصول عليها أن العملية تتم بالكامل في الحالة اللدنة اللزجة المستقرة، ودون نقطة الانصهار البلوري للبولي إيثيلين عالي الكثافة (PEHD)، كما تسلط الضوء على الدور الأساسي لسرعة الدوران وتفاعلها المتبادل مع زاوية الميل. تفتح ظروف التشغيل المثلى التي تم تحديدها آفاقاً واعدة لتطبيق تقنية اللحام بالاحتكاك والخلط في الإصلاح الصناعي لمكونات بوليمر اللدائن الحرارية، مع التأكيد على الحاجة إلى إجراء تجارب إضافية لتعزيز المتانة الإحصائية للنموذج المقترح.

الكلمات المفتاحية: بولي إيثيلين عالي الكثافة (PEHD)؛ اللحام بالاحتكاك والخلط (FSW)؛ إصلاح البوليمرات؛ تصميم التجارب (DoE)؛ الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)؛ التحسين الحراري.

Sommaire

REMERCIEMENTS	I
RESUME.....	II
INTRODUCTION GENERALE.....	1
I LES POLYMERES ET LA REPARATION PAR SOUDAGE FSW	
INTRODUCTION	4
I.1 LES MATERIAUX POLYMERES:	5
I.1.1 Définition :.....	5
I.1.2 Historique	6
I.1.3 Classification des polymères	7
I.1.4 Définition polyéthylène haute densité (PEHD) :.....	9
I.1.5 Propriétés de PEHD :.....	10
I.1.6 Domaines d'application:.....	11
I.2 PROBLEMATIQUE DE LA FISSURATION DANS LES POLYMERES	12
I.2.1 Mécanismes de rupture et de fatigue	12
I.2.2 Types de fissures (Microfissures vs Macro-fissures)	12
I.2.3 Impact des fissures sur l'intégrité des structures en PEHD	14
I.3 SOUDAGE	15
I.3.1 Définition.....	15
I.3.2 Historique	16
I.3.3 Panorama des procédés de soudage industriels	17
A. Procédés par fusion (Phase liquide) :	17
B. Procédés à l'état solide et brasage.....	18
I.4 PRINCIPE DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)	19

Sommaire

I.4.1	Définition.....	19
I.4.2	Description de l'outil FSW	20
I.4.3	Principe et Déroulement du Procédé	21
I.4.4	Typologie des joints de soudure en FSW	22
I.4.5	Les Paramètres Opératoires Du Soudage FSW	23
I.5	TECHNIQUES DE REPARATION DES POLYMERES	24
I.5.1	Réparations conventionnelles	24
I.5.2	Limites des méthodes classiques	25
I.5.3	Avantages de la réparation par le soudage FSW	26
I.5.4	Limites et Inconvénients techniques	26
CONCLUSION :.....		27

II METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

INTRODUCTION		29
II.1	PLAN D'EXPERIENCES:.....	29
II.1.1	Définition.....	29
II.1.2	Vocabulaire de Base des Plans d'Expériences.....	30
II.1.3	Les Étapes des Plans d'Expériences	31
II.1.4	Les Types de Plans d'Expériences	32
II.1.5	Apports de la méthodologie DOE	34
II.1.6	Objectif de la Modélisation	34
II.1.7	Fondements de la Modélisation Mathématique.....	35
II.2	METHODE DE PLAN FACTORIEL COMPLET	37
Définition		37
II.2.1	Plan factoriel a deux niveaux.....	37
II.2.2	Constitution du Plan Factoriel Complet	38
II.3	REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE ET VALIDATION DU MODELE	42

Sommaire

II.3.1	Estimation des Coefficients par la Méthode des Moindres Carrés.....	42
II.3.2	Analyse de Variance (ANOVA) — Test de Fisher	43
II.3.3	Logiciels et Outils de Calcul	45
CONCLUSION.....		46
III RESULTATS ET DISCUSSIONS		
INTRODUCTION		48
III.1	DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CONDUITE DES ESSAIS	48
III.1.1	Formulation mathématique et approche matricielle du modèle	53
III.2	VALIDATION DU MODELE	54
III.2.1	Test de Fisher	54
III.2.2	Test de Student	57
III.3	ENRICHISSEMENT DE LA BASE DE DONNEES ET MODELISATION PAR RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS (ANN).....	63
III.3.1	Enrichissement de la base de données.....	63
III.3.2	Optimisation et Amélioration du Modèle Thermique ANN.....	64
III.3.3	Analyse et discussion des résultats.....	64
III.3.4	Conditions optimales de soudage	65
III.4	CONCLUSION	66
CONCLUSION GENERALE		69

Liste des figures

Chapitre I : Les Polymères et La Réparation par soudage FSW

Figure I-1: Monomère C ₂ H ₄ et chaîne macromoléculaire (C ₂ H ₄) _n [1]	5
Figure I-2 : Polyéthylène haute densité.....	9
Figure I-3 Représentation schématique du mécanisme de crazing et de la transition vers la fissure [13]	12
Figure I-4 : Distribution des contraintes et champ de déformation à la pointe d'une fissure [15]	13
Figure I-5: Micrographies MEB montrant l'amorçage de micro-fissures aux interfaces des sphérolites dans le PEHD [16]	14
Figure I-6: Exemple réel d'une défaillance par fissuration longitudinale dans une conduite en PEHD.....	15
Figure I-7: Courbe de régression montrant les différents modes de défaillance des conduites en polymère en fonction du temps et de l'effort [18]	15
Figure I-8 : soudage oxyacétylénique [28]	Figure I-9: Soudage MMA [29]..... 18
Figure I-10: Soudage TIG [26]	Figure I-11: Soudage MIG/MAG [30] 18
Figure I-12: Soudage par résistance [31]	18
Figure I-13: Soudage par friction [33]	19
Figure I-14: Soudure à l'étain [34]	19
Figure I-15 : Schéma technique décrivant le mécanisme de soudage par friction malaxage [36]	20
Figure I-16: Schéma de l'outil FSW [23]	21
Figure I-17: Principe de FSW [37].....	22
Figure I-18: Configurations de joints pour le soudage par friction malaxage : (1) 2) bout à bout, (3) transparence. (4) transparence multiple, (5) en T, (6) T par transparence, (7) coin, et (8) angle [42].....	23
Figure I-19: le soudage par extrusion du polymères [44]	25
Figure I-20: Le collage par adhésifs (colles) [46]	25

Chapitre II : METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

Figure II-1: Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs [50]	30
Figure II-2: L'espace et le point expérimental [51]	31
Figure II-3: La surface de réponse	35

Liste des figures

Figure II-4: exemple graphique sur L'optimisation de la réponse.....	35
Figure II-5: Plans factoriels complets $2^2 \ 2^3 \ 2^4$ [63].....	38

Chapitre III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure III-1: Dimensions géométriques (en mm) des plaques en PEHD préparées pour le soudage	49
Figure III-2: Vue générale de la fraiseuse conventionnelle (WBM20) utilisée pour les essais FSW	50
Figure III-3 : dispositif de fixation et montage de bridage des plaques en PEHD sur la table de la machine.....	50
Figure III-4 : Profils expérimentaux de l'évolution de la température enregistrée par le pyromètre	51
Figure III-5: Corrélation entre les températures maximales expérimentales (Observé) et les températures prédites par le modèle mathématique	56
Figure III-6 : effet des facteurs principaux	58
Figure III-7: effet des interactions (N/Vf)	59
Figure III-8: iso courbe des figures 3D (N/Vf).....	60
Figure III-9: Surfaces de réponse 3D de l'interaction entre l'angle d'inclinaison ($\emptyset$) et la vitesse d'avance (Vf) à valeurs constantes de la vitesse de rotation (a) N = 1395 tr/min, (b) N = 1427,5tr/min et (c) N = 1460 tr/min}	60
Figure III-10 : Cartographies des iso-courbes de l'interaction entre l'angle d'inclinaison ($\emptyset$) et la vitesse d'avance (Vf) à valeurs constantes de la vitesse de rotation (a) N = 1395 tr/min, (b) N = 1427,5tr/min et (c) N = 1460 tr/min}	62
Figure III-11: Validation croisée des modèles RSM et ANN — corrélation prédiction/expérience, évolution de la température et comparaison des erreurs (RMSE)	64

Liste des tableaux

Chapitre I : Les Polymères et La Réparation par soudage FSW

Tableau I-1: Classification et Domaines d'application polymères [8–10]	7
Tableau I-2 : Propriétés de PEHD [10].....	10

Chapitre II : méthode des plans d'expériences

Tableau II-1 : Principaux types de plans d'expériences et leurs caractéristiques	34
Tableau II-2 : Matrice d'un plan 2^2	38
Tableau II-3: Matrice d'un plan 2^3	39
Tableau II-4: Matrice d'expériences et réponses pour un plan complet 2^3	40
Tableau II-5 : Matrice d'expérience avec effets pour un plan factoriel complet 2^3	42
Tableau II-6: Tableau ANOVA [68]	44
Tableau II-7 : Synthèse des progiciels d'analyse de régression et leurs paramètres.....	46

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau III-1: résultat de l'expérience	51
Tableau III-2: Qualité de joint de soudure pour chaque essai	52
Tableau III-3: Valeurs des paramètres codés	53
Tableau III-4 : Valeurs théorique des facteurs et interactions.....	54
Tableau III-5: Tableau globale des facteurs et les interactions	54

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans un contexte industriel marqué par des exigences croissantes en matière de performance, de durabilité et de maîtrise des coûts opérationnels, la capacité à assembler et à réparer efficacement les matériaux est devenue un enjeu stratégique majeur. Les matériaux polymères ont progressivement conquis une place de premier plan dans de nombreux secteurs d'activité, en raison de leur faible densité, de leur excellente tenue aux environnements corrosifs et de la souplesse qu'ils offrent lors de leur mise en forme. Toutefois, ces matériaux ne sont pas à l'abri des sollicitations mécaniques qui, accumulées au fil du temps, peuvent engendrer l'apparition de fissures ou d'autres défauts internes, fragilisant ainsi l'intégrité et les performances des structures.

Face à cette problématique, diverses solutions de réparation ont émergé. Parmi elles, le procédé de soudage par friction malaxage — désigné par l'acronyme FSW pour Friction Stir Welding — s'impose comme une technique innovante dont l'objectif est de remettre en service des pièces endommagées. Mis au point en 1991 par The Welding Institute (TWI) au Royaume-Uni, ce procédé thermomécanique génère de la chaleur par friction entre la pièce et un outil rotatif, permettant un malaxage localisé du matériau en deçà de sa température de fusion. Il en résulte des assemblages et des réparations de haute qualité, avec une réduction significative des défauts inhérents aux procédés de soudage par fusion.

Initialement développé pour les alliages métalliques, le FSW suscite un intérêt grandissant pour les matériaux plastiques. En effet, si son utilisation pour le soudage de pièces polymères est déjà documentée, son application à la réparation de plastiques fissurés constitue une voie d'investigation très prometteuse pour prolonger la durée de vie des structures tout en réduisant les coûts liés au remplacement des pièces endommagées. Cependant, le comportement des polymères lors du procédé FSW, et notamment l'évolution de leurs propriétés mécaniques après traitement, demeure insuffisamment caractérisé.

Dans ce cadre, la validation des propriétés mécaniques locales de la zone réparée s'avère indispensable pour évaluer la qualité de l'opération et quantifier l'impact du procédé sur le matériau. Parallèlement, le recours à des techniques d'imagerie avancées, telles que la radiographie X, permet d'accéder à une compréhension plus fine des phénomènes physiques mis en jeu durant la réparation.

Par ailleurs, les avancées récentes dans les domaines de l'analyse de données et de l'intelligence artificielle ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optimisation des procédés

Introduction Générale

industriels. L'exploitation de méthodes issues du Machine Learning permet notamment d'analyser les résultats expérimentaux et de quantifier l'influence des paramètres du procédé — tels que la vitesse de rotation, l'angle d'inclinaison de l'outil ou la profondeur de pénétration — afin d'identifier les conditions de fonctionnement les plus favorables.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier de manière expérimentale et numérique la réparation de polymères fissurés au moyen du procédé de friction malaxage. L'étude vise à analyser l'évolution des propriétés mécaniques du matériau après réparation, à examiner la structure interne de la zone traitée et à exploiter des approches basées sur l'intelligence artificielle pour déterminer les paramètres optimaux du procédé.

Ce mémoire s'organise en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique portant sur le procédé de friction malaxage et les matériaux polymères. Le deuxième chapitre expose la méthodologie expérimentale et les approches numériques adoptées. Le troisième chapitre présente et discute les résultats obtenus.

Chapitre I : Les polymères et la réparation par soudage FSW

I Les polymères et la réparation par soudage FSW

Introduction

Les polymères occupent aujourd'hui une place prépondérante dans le paysage industriel mondial, s'imposant comme une alternative technologique majeure aux alliages métalliques dans des secteurs de pointe tels que l'aéronautique, l'automobile et le transport des fluides. Cette ascension s'explique par leur légèreté exceptionnelle, leur haute résistance spécifique, et leur excellente tenue à la corrosion. Parmi ces matériaux, le Polyéthylène Haute Densité (PEHD) se distingue par ses propriétés physico-chimiques remarquables, et sa résilience face aux chocs, ce qui en fait un choix structurel privilégié.

Cependant, la durabilité à long terme de ces composants reste un défi technique et économique majeur. Sous l'effet des contraintes mécaniques et du vieillissement environnemental, les structures en polymères sont sujettes à l'apparition de micro-fissures. Si elles ne sont pas traitées, ces discontinuités peuvent évoluer vers une rupture brutale, compromettant l'intégrité globale du système. Dans une optique de maintenance durable, la réparation de ces défauts devient impérative pour prolonger la durée de vie des composants sans recourir à leur remplacement systématique.

C'est dans ce cadre que le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW - Friction Stir Welding) émerge comme une solution innovante pour la cicatrization des fissures. Contrairement aux méthodes conventionnelles basées sur la fusion ou le collage, le FSW opère à l'état solide, permettant une redistribution de la matière par malaxage plastique. Appliquée au PEHD, cette technique offre la possibilité de restaurer la continuité matière et de recouvrer les propriétés mécaniques initiales, tout en limitant les déformations thermiques.

L'objectif de ce premier chapitre est de poser les jalons théoriques nécessaires à notre étude. Nous présenterons une synthèse sur les caractéristiques du PEHD et les mécanismes de sa fissuration. Ensuite, nous détaillerons le fonctionnement du procédé FSW en mettant l'accent sur son potentiel en tant qu'outil de réparation. Cette base théorique servira de support à la démarche expérimentale et à la modélisation numérique que nous développerons dans la suite de ce travail pour optimiser les paramètres de restauration.

I.1 Les Matériaux Polymères:

I.1.1 Définition :

Sur le plan structural, un polymère est une substance macromoléculaire à deux ou trois dimensions, issue de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités chimiques identiques ou proches, appelées monomères. Ces unités élémentaires sont reliées entre elles lors d'une étape de synthèse chimique dénommée polymérisation. Les chaînes macromoléculaires ainsi formées sont caractérisées par des masses molaires très élevées, généralement comprises entre 10^4 et 10^6 g.mol⁻¹

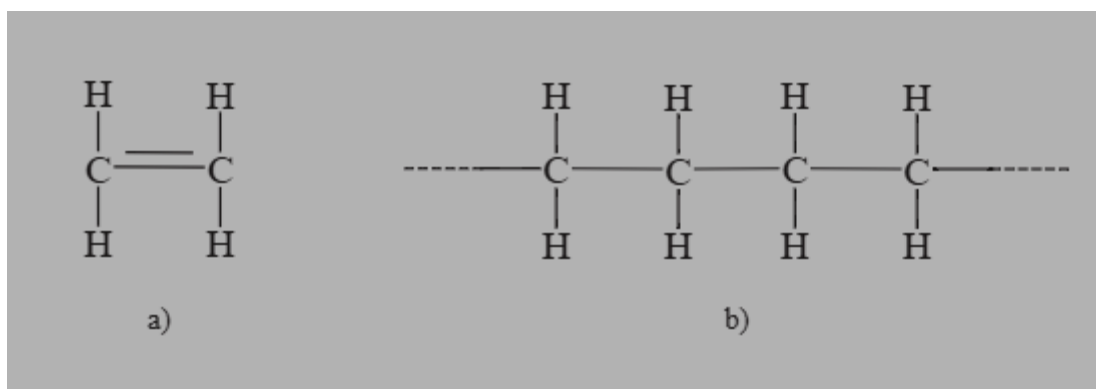


Figure I-1: Monomère C₂H₄ et chaîne macromoléculaire (C₂H₄)_n [1]

Contrairement aux métaux, dont la structure repose sur un arrangement atomique cristallin bien ordonné, les polymères se distinguent par l'enchevêtrement caractéristique de leurs longues chaînes moléculaires. Cet enchevêtrement est à l'origine de leurs propriétés viscoélastiques, dont la compréhension a été fondamentalement renouvelée grâce aux travaux pionniers de Hermann Staudinger dans les années 1920, qui ont introduit la notion de macromolécule et ouvert un nouveau champ de recherche en chimie organique. Le polyéthylène, l'un des polymères les plus courants, est ainsi constitué de la répétition du motif structural $\text{---}(\text{CH}_2\text{---CH}_2)_n\text{---}$, obtenu par polymérisation de l'éthylène gazeux.

D'un point de vue rhéologique, un matériau à l'état plastique se définit comme une substance capable de subir des déformations permanentes sous l'effet de sollicitations thermomécaniques — température et pression — sans perdre sa cohésion interne, ce qui permet sa mise en forme par différents procédés [2]

I.1.2 Historique

Bien que l'utilisation de polymères naturels remonte à l'Antiquité, leur étude scientifique systématique ne débute qu'au XIX^e siècle. En 1838, Anselme Payen procède à l'identification de la cellulose, polymère naturel majoritaire dans la paroi des cellules végétales. Quelques années plus tard, en 1844, Charles Goodyear met au point le processus de vulcanisation du caoutchouc naturel, améliorant substantiellement sa résistance mécanique et son élasticité. C'est en 1846 que Christian Schönbein synthétise la nitrocellulose, souvent considérée comme le premier polymère artificiel [3]

Le terme même de « polymère » n'apparaît qu'en 1866, sous la plume de Marcellin Berthelot, qui observe la polymérisation du styrène en une résine solide. La fin du XIX^e siècle voit s'amorcer l'industrialisation des polymères, notamment avec la mise au point de la soie artificielle par Hilaire de Chardonnet en 1883 [4]. L'essor de l'industrie plastique est véritablement amorcé au début du XX^e siècle avec la synthèse de la bakélite en 1910 par Leo Baekeland, premier polymère entièrement synthétique à visée industrielle [5]

Dans les années 1920, Hermann Staudinger révolutionne la compréhension des polymères en formulant le concept de macromolécule, réfutant définitivement la théorie colloïdale alors dominante [6]

La Seconde Guerre mondiale représente un tournant décisif pour le développement des polymères synthétiques, notamment aux États-Unis où les pénuries de caoutchouc naturel ont stimulé la mise au point d'équivalents synthétiques. Le nylon (1938) et les polyuréthanes (1943) émergent durant cette période. Dans les années 1950, l'essor de la pétrochimie rend possible la production économique des principaux thermoplastiques modernes : polyéthylène (PE), polypropylène (PP), polystyrène (PS) et polychlorure de vinyle (PVC) [7]

Depuis la fin du XX^e siècle, la recherche s'oriente vers les polymères techniques et écologiques, avec l'avènement des bioplastiques, des polymères conducteurs et des matériaux à mémoire de forme — domaine pour lequel Shirakawa, Heeger et MacDiarmid ont reçu le Prix Nobel de chimie en 2000.

I.1.3 Classification des polymères

Ce tableau présente une synthèse structurée des différentes classifications des matériaux polymères, en mettant l'accent sur les critères pertinents pour l'étude de la réparation par FSW.

Tableau I-1: Classification et Domaines d'application polymères [8–10]

<i>Critère de classification</i>	<i>Catégories</i>	<i>Caractéristiques principales</i>	<i>Exemples typiques</i>	<i>Domaines d'application et Exemples</i>
Origine et Synthèse	Naturels	Issus de ressources biologiques sans modification lourde.	Cellulose, Caoutchouc naturel	Industrie Textile : Vêtements (Nylon, Soie), textiles techniques.
	Synthétiques	Obtenus par polymérisation de monomères issus de la pétrochimie.	PEHD (notre étude), PVC, Nylon	
	Semi-synthétiques	Polymères naturels transformés par voie chimique pour améliorer leurs propriétés.	Acétate de cellulose, Caoutchouc vulcanisé	Plasturgie : Emballages, bouteilles, sacs en polyéthylène.
Comportement Thermomécanique	Thermoplastiques	Matériaux fusibles, recyclables et capables de subir plusieurs cycles de mise en forme.	PE, Polypropylène (PP)	Automobile : Pare-chocs (PP). Tuyauterie : Transport de fluides (PEHD).
	Thermodurcissables	Structures infusibles après réticulation,	Résines Époxy, Phénoplastes	Aéronautique : Composants de

Chapitre I : Les Polymères et La Réparation par soudage FSW

		offrant une grande stabilité thermique.		fiusées, résines époxy.
	Élastomères	Possèdent une élasticité élevée (capacité de recouvrance après déformation).	Silicone, Caoutchouc synthétique	Pneumatiques : Caoutchouc synthétique, joints d'étanchéité.
Architecture Moléculaire	Linéaires	Chaînes simples sans ramifications, favorisant une haute densité.	PEHD	Biomédical : Implants, prothèses, dispositifs médicaux.
	Ramifiés	Présence de chaînes latérales réduisant la compacité du matériau.	PEBD	
	Réticulés	Réseau tridimensionnel rigide empêchant tout glissement des chaînes.	Polymères thermodurcis	
Usage Industriel	Grande diffusion	Production massive pour des applications courantes et emballages.	Polystyrène, Polyéthylène	Ingénierie : Remplacement des métaux, emballages alimentaires.
	Techniques	Propriétés mécaniques élevées, utilisés en substitution des métaux.	Polyamides (PA), Polyacétals	

Bien que les polymères synthétiques tels que le PEHD posent des défis environnementaux en raison de leur faible biodégradabilité, le développement de techniques de réparation comme le FSW constitue une réponse durable à ces enjeux. En permettant la restauration des structures fissurées plutôt que leur remplacement, cette approche contribue à la réduction des déchets plastiques et à l'allongement de la durée de vie des composants industriels.

I.1.4 Définition polyéthylène haute densité (PEHD) :

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un polymère thermoplastique dérivé du pétrole, constitué de chaînes d'unités éthyléniques liées en séquence. Ce matériau se distingue par une densité élevée, généralement comprise entre 0,93 et 0,97 g/cm³, conférant au matériau une rigidité extérieures [10]

Grâce à ces propriétés, le PEHD est employé dans une vaste gamme d'applications, notamment dans la fabrication de tuyaux, de réservoirs de stockage, de films d'emballage alimentaire, de contenants industriels et de pièces techniques diverses. Il présente également des avantages indéniables du point de vue de la durabilité et du comportement à long terme[11]



Figure I-2 : Polyéthylène haute densité

I.1.5 Propriétés de PEHD :

Tableau I-2 : Propriétés de PEHD [10]

Catégorie	Propriété	Valeur / Caractéristique
Mécanique	Résistance à la traction (Rm)	20 – 37 MPa
	Module d'élasticité	800 – 1500 MPa (Flexibilité modérée)
	Dureté	Indice SD65 (Rigide et dur)
	Résistance aux chocs	Très élevée
	Allongement à la rupture	20 – 1000 %
Physique	Densité	0,93 – 0,97 g/cm ³
	Structure	Polyoléfine semi-cristalline
Thermique	Température de fusion (Tf)	124 – 135 °C
	Température d'utilisation (continu)	Jusqu'à ~90 °C
	Température de fragilisation	Environ -110 °C
Chimique	Résistance élevée	Acides, alcools, aldéhydes, hydrocarbures
	Sensibilité	Agents oxydants (risque de biofilm)
Rayonnements	Rayonnements ionisants	Résistance modérée (Rayons X et Gamma)
	Résistance aux UV	Sensible (nécessite des stabilisants/additifs)

Le polyéthylène haute densité est un matériau thermoplastique. Il peut être assemblé par des techniques de soudure diverses. Ce point fait du PEHD un matériau de choix dans des domaines d'application aussi variés que la plomberie, la tuyauterie industrielle, la fabrication de bacs ou la réalisation de revêtements.[11]

I.1.6 Domaines d'application:

Grâce à la combinaison de ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques, le PEHD est utilisé dans un large éventail de secteurs industriels :

- **Industrie et Construction (Infrastructures)** : Matériau privilégié pour les infrastructures à longue durée de service du fait de sa résistance à la corrosion et à l'abrasion. Il est utilisé pour les tuyaux de distribution d'eau potable, les réseaux d'assainissement et les canalisations de gaz sous pression.
- **Géomembranes et Protection de l'Environnement** : Employé comme barrière d'étanchéité pour prévenir la migration de polluants vers les sols ou les nappes phréatiques dans les bassins de rétention, les centres d'enfouissement technique et les toitures végétalisées.
- **Stockage Industriel et Chimique** : Sa haute inertie chimique permet de stocker en toute sécurité des substances corrosives telles que des acides, des bases ou des produits chimiques industriels, dans des cuves ou des fûts de transport.
- **Emballage et Usage Domestique** : Son excellent rapport rigidité/densité optimise les coûts de transport et assure la sécurité des produits : bouteilles de lait, flacons de détergents, bacs de rangement et conteneurs alimentaires hermétiques.
- **Automobile et Transport** : Contribue à l'allègement des véhicules pour réduire la consommation énergétique tout en garantissant une haute résistance aux chocs : réservoirs de carburant, gaines de protection pour câbles, composants de carrosserie.
- **Agriculture et Irrigation** : Adapté aux conditions climatiques sévères lorsqu'il est stabilisé contre les UV : tuyaux d'irrigation goutte-à-goutte, bâches de serres et filets de protection.
- **Secteur Médical et Pharmaceutique** : Utilisé pour les applications nécessitant une stérilisation fréquente et une résistance aux solvants : flacons de médicaments, seringues à usage unique, tubes médicaux spécialisés

- **Loisirs et Nautisme** : Sa flottabilité naturelle et sa résistance à l'eau de mer en font un matériau idéal pour les structures aquatiques : kayaks, pontons flottants et équipements de jeux en plein air.

I.2 Problématique de la fissuration dans les polymères

I.2.1 Mécanismes de rupture et de fatigue

La rupture des polymères semi-cristallins, tels que le PEHD, se distingue fondamentalement de celle des métaux par leur comportement viscoélastique. Ce processus est principalement régi par deux phénomènes :

- **Le Crazing (Craquelage)** : Il s'agit du mécanisme précurseur de la rupture. Sous l'effet d'une contrainte de traction, des micro-vides se forment au sein de la structure. Ces cavités sont stabilisées par des fibrilles de polymère alignées. Bien que cette zone de "craquelage" puisse encore supporter une charge partielle, elle constitue une amorce de rupture imminente qui précède l'ouverture de la fissure.
- **Fatigue Thermomécanique** : En raison de la faible conductivité thermique du PEHD, l'énergie dissipée lors des cycles de chargement n'est pas évacuée, mais transformée en chaleur. Cela provoque un ramollissement localisé du matériau, accélérant la propagation des fissures et menant à une rupture prématurée [12]

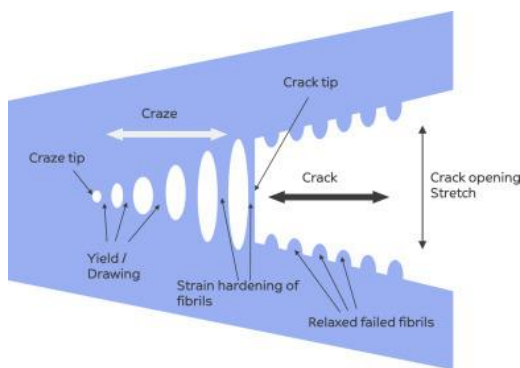


Figure I-3 Représentation schématique du mécanisme de crazing et de la transition vers la fissure [13]

I.2.2 Types de fissures (Microfissures vs Macro-fissures)

Dans l'étude de l'intégrité des structures, il est crucial de distinguer l'échelle du défaut pour adapter la stratégie de réparation par FSW :

- **Micro-fissures** : Souvent invisibles à l'œil nu, elles prennent naissance aux interfaces des sphérolites. Elles se propagent par la rupture des liaisons intermoléculaires et des chaînes polymères. À ce stade, la réparation par FSW agit comme un traitement de surface (FSP) pour homogénéiser la matière.
- **Macro-fissures** : Elles résultent de la coalescence des micro-fissures. Ces défauts macroscopiques agissent comme des concentrateurs de contraintes critiques. Selon la mécanique de la rupture, le facteur d'intensité de contrainte (K) à la pointe de ces fissures peut dépasser la ténacité du matériau, entraînant une rupture catastrophique si aucune intervention n'est réalisée.[14]

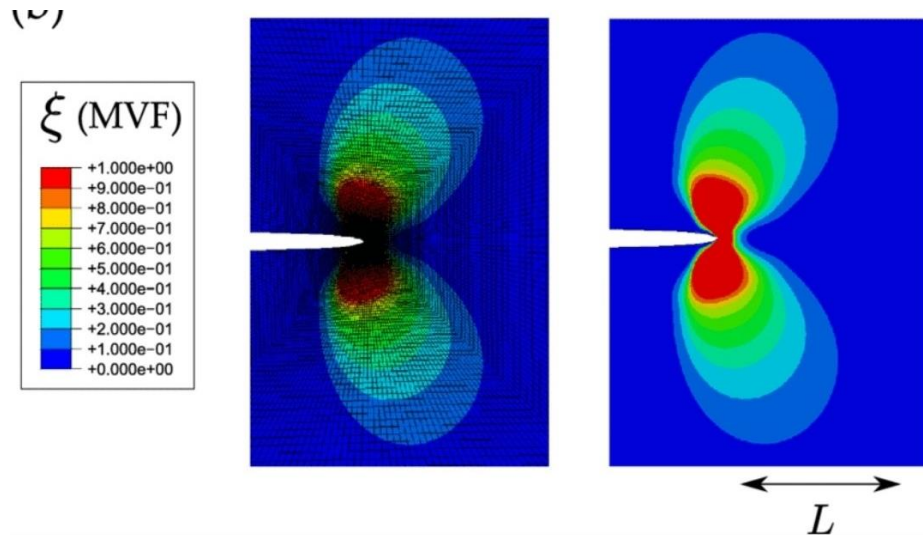


Figure I-4 : Distribution des contraintes et champ de déformation à la pointe d'une fissure [15]

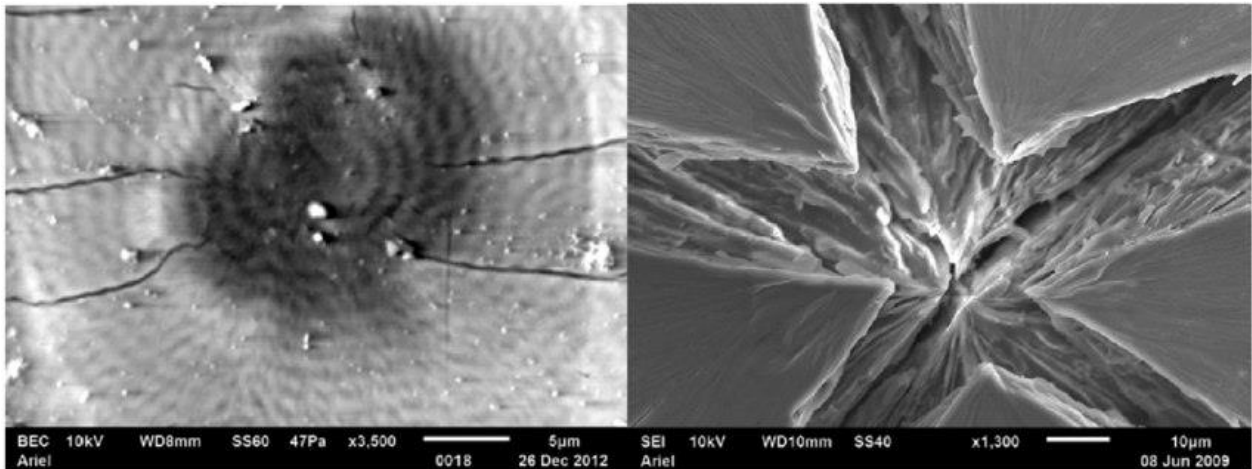


Figure I-5: Micrographies MEB montrant l'amorçage de micro-fissures aux interfaces des sphérolites dans le PEHD [16]

I.2.3 Impact des fissures sur l'intégrité des structures en PEHD

La présence de fissures dans les composants en PEHD (canalisations de gaz, réservoirs) engendre des risques majeurs :

Rupture fragile à long terme (**SCG - Slow Crack Growth**) : Même sous des contraintes bien inférieures à la limite élastique, une fissure peut croître lentement sur une période prolongée (plusieurs années). Ce mécanisme est particulièrement dangereux car il est difficilement détectable avant la défaillance finale.

Perte d'étanchéité et de performance : Pour les applications de transport de fluides sous pression, une fissure traversante entraîne une fuite immédiate, rendant la structure hors service.

Nécessité de la réparation par FSW : Le procédé FSW permet d'éliminer ces concentrateurs de contraintes en transformant la zone fissurée en une zone malaxée et recristallisée, restaurant ainsi la continuité structurelle de la pièce.[17]



Figure I-6: Exemple réel d'une défaillance par fissuration longitudinale dans une conduite en PEHD

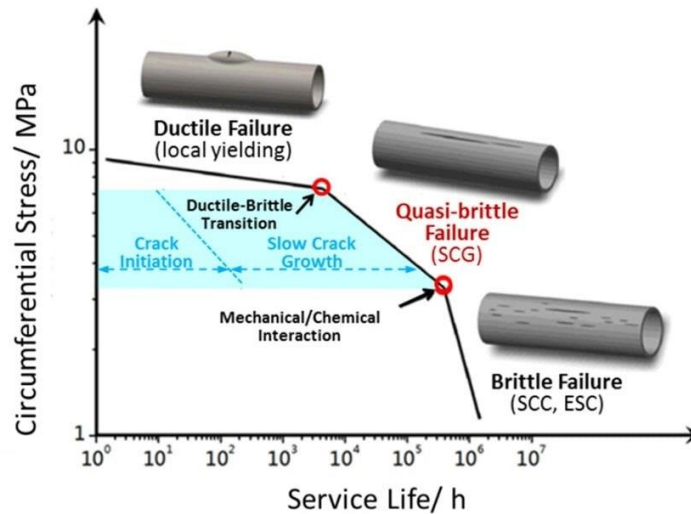


Figure I-7: Courbe de régression montrant les différents modes de défaillance des conduites en polymère en fonction du temps et de l'effort [18]

I.3 Soudage

I.3.1 Définition

La soudure est une technique de mise en œuvre qui implique le collage de deux ou plusieurs composantes, en général métalliques, grâce au feu, avec ou sans pression, de sorte qu'ils fondent ou se lient ensemble. En certaines situations, le feu et la pression sont combinés pour garantir un meilleur collage entre les substances.

Cette technique joue un rôle clé dans le secteur industriel, particulièrement lors de la production de structures et d'équipements, où elle permet d'obtenir des joints solides et durables. Des industries comme l'aéronautique, l'automobile, ainsi que le pétrole et gaz nécessitent des techniques de soudage de qualité, selon les caractéristiques individuelles de chaque substance.

I.3.2 Historique

L'invention du soudage remonte à l'Antiquité, lorsque cette technique était largement pratiquée par le soudage à la forge, technique qui consiste en le chauffage et martelage de métal pour en former des joints. Cependant, ce type de soudage dominait jusqu'au XIX^e siècle. L'une des innovations majeures dans cette discipline a été apportée avec le développement de l'utilisation des gaz pour le chauffage des métaux vers la deuxième moitié du XIX^e siècle.[19]

En outre, à la fin du XIX^e siècle, plusieurs types de soudages ont été créés. Parmi ces derniers figurent le soudage oxyacétylénique, le soudage aluminothermique, et le soudage à l'arc électrique et par résistances technologies, aux matériaux innovants et aux exigences croissantes de performance.

Au cours du début du vingtième siècle, le soudage est largement devenu un procédé industriel utilisé dans plusieurs industries comme l'aéronautique, le domaine naval et aussi celui automobile. Il y avait beaucoup de changements apportés sur les techniques de conception et de production en utilisant le soudage. Par exemple, en ce qui concerne l'industrie des ouvrages d'art, l'utilisation de soudage a apporté un certain nombre de modifications dans la fabrication des ponts. Avec l'essor de ce domaine à partir des années 1930, il était nécessaire d'assurer une main d'œuvre spécialisée pour laquelle les premiers cours professionnels sur le travail de soudeur ont été lancés.[20]

Les autres processus modernes de soudage qui ont émergé au cours du vingtième siècle comprenaient soudage par faisceau d'électrons, soudage au laser, soudage par ultrasons et soudage par explosion.[21] Plus tard, l'intégration de microélectronique et de robotisation s'est avérée être un grand progrès qui a amélioré la précision et la qualité du soudage.[22]

Les développements des dernières décennies se sont consacrés à la modernisation des outils, des matériaux de renfort et des conditions de travail, en particulier du point de vue de la sécurité. Le soudage devient indispensable processus industriel pour nombre de branches productives, s'adaptant toujours aux innovations technologiques et matérielles.[23]

I.3.3 Panorama des procédés de soudage industriels

Les techniques d'assemblage permanent ont évolué pour répondre aux exigences spécifiques des matériaux et des structures. On peut classer ces procédés en deux grandes familles :

A. Procédés par fusion (Phase liquide) :

Cette catégorie regroupe les méthodes où le métal de base atteint son point de fusion. **Le soudage oxyacétylénique** utilise l'énergie thermique d'une flamme [24], tandis que **le soudage à l'arc** exploite l'énergie électrique [19]. Dans ce dernier, la précision varie selon la protection utilisée : le procédé **MMA** reste le plus rustique, alors que le **TIG et le MIG/MAG** offrent une pureté métallurgique supérieure grâce à l'utilisation de gaz inertes (Argon). [25] [26]

Enfin, **le soudage par résistance** se distingue par une fusion localisée sous pression, technique pivot dans la construction de carrosseries automobiles [27]

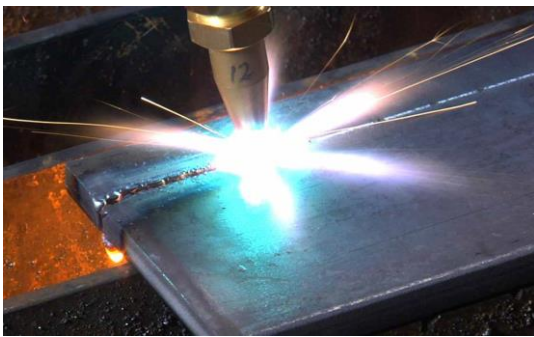


Figure I-8 : soudage oxyacétylénique [28]



Figure I-9: Soudage MMA [29]



Figure I-10: Soudage TIG [26]



Figure I-11: Soudage MIG/MAG [30]

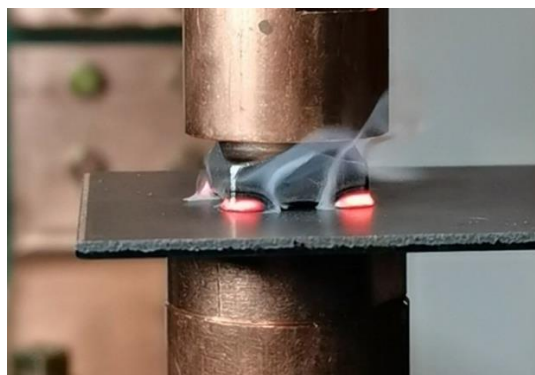


Figure I-12: Soudage par résistance [31]

B. Procédés à l'état solide et brasage

Contrairement aux méthodes précédentes, **le soudage par friction** (dont dérive le **FSW**) permet d'unir des métaux sans atteindre la fusion, ce qui évite les défauts thermiques classiques sur des alliages sensibles comme l'aluminium.[32] Par ailleurs, **le brasage tendre (soudure à l'étain)** se limite à la fusion d'un métal d'apport sans altérer les pièces de base, une méthode privilégiée pour la connectivité électronique.

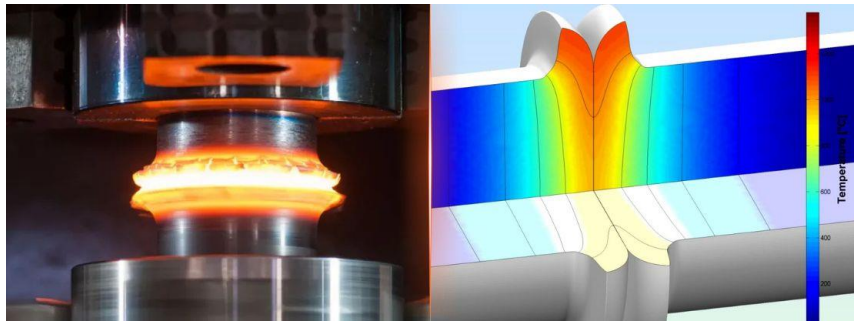


Figure I-13: Soudage par friction [33]



Figure I-14: Soudure à l'étain [34]

I.4 Principe du soudage par friction malaxage (FSW)

I.4.1 Définition

Le procédé de soudage par friction malaxage (SFM) est une technique d'assemblage à l'état solide. Dans ce procédé, un outil cylindrique non consommable, composé d'un pion et d'un épaulement, est mis en rotation puis plongé dans le matériau à assembler jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface de la pièce.

L'outil est ensuite déplacé le long de la ligne de soudure. La chaleur générée par la friction entre l'épaulement de l'outil et le matériau entraîne un ramollissement local du matériau, qui subit alors une déformation plastique sous l'action du pion rotatif.

Cette déformation, réalisée à une température inférieure à celle de fusion du matériau, favorise le mélange et la consolidation de la matière dans la zone de soudure. Ainsi, l'assemblage est réalisé sans atteindre l'état liquide, ce qui permet de limiter les défauts généralement associés aux procédés de soudage par fusion.[35]

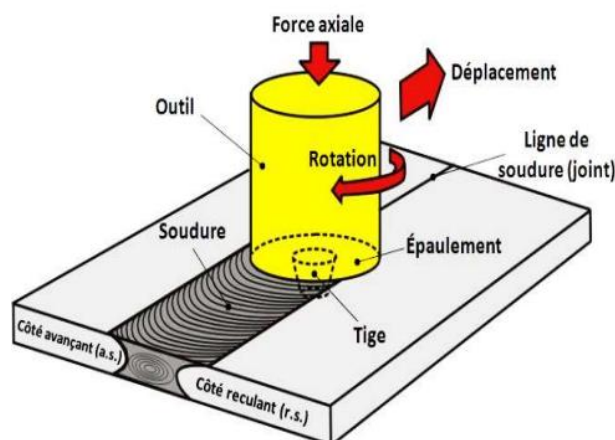


Figure I-15 : Schéma technique décrivant le mécanisme de soudage par friction malaxage [36]

I.4.2 Description de l'outil FSW

Dans le procédé de soudage par friction malaxage (FSW), l'outil utilisé est un facteur crucial qui influence à la fois la qualité du joint soudé et les conditions de fonctionnement de ce procédé. L'épaulement et la goupille sont les principaux composants de cette structure. L'épaulement exerce le plus de chaleur en raison du frottement sur la surface du matériau, tandis que la goupille offre des capacités supplémentaires d'agitation et de mélange du matériau plastifié dans la zone de soudure.[35]

La forme de l'outil est un facteur crucial dans la détermination du flux de matériau, de la répartition de la chaleur à appliquer et de la vitesse de soudage. Les défauts au niveau de l'épaulement, de la goupille, de la forme, de la taille et du profil du joint ont des effets directs sur sa microstructure et sa qualité finales. [23]

Des joints homogènes peuvent être obtenus même pour des plaques épaisses et les défauts liés à un mauvais flux de matériaux sont moins susceptibles de se produire grâce à ces progrès. Par conséquent, la conception et la sélection appropriées des outils doivent être assurées pour maximiser l'efficacité du processus FSW.[36]

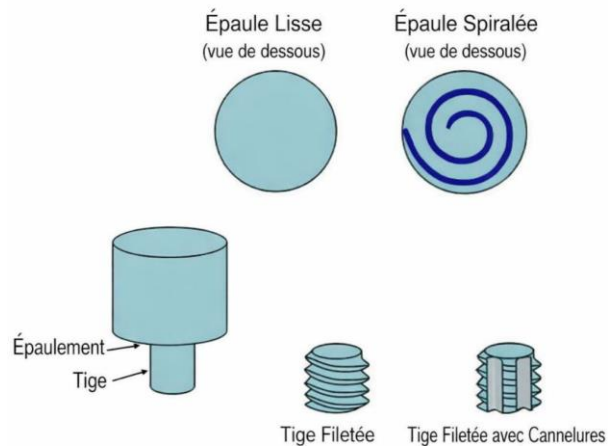


Figure I-16: Schéma de l'outil FSW [23]

I.4.3 Principe et Déroulement du Procédé

Le déroulement du FSW s'effectue en quatre phases distinctes et successives :

Le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) se déroule selon une succession d'étapes interdépendantes assurant la formation progressive du joint soudé.

Dans un premier temps, l'outil rotatif est introduit progressivement dans le matériau sous l'effet d'un effort axial contrôlé. Cette pénétration s'accompagne d'une génération de chaleur due au frottement entre le pion et la matière environnante, ce qui provoque un ramollissement local facilitant l'enfoncement de l'outil [40]. L'introduction se poursuit jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces à assembler, garantissant ainsi un confinement adéquat du matériau plastifié [26].

Une fois cette condition atteinte, une phase de stabilisation thermique s'installe. Durant cette étape, appelée temps de préchauffage ou dwell-time, l'outil reste en rotation sans déplacement afin d'augmenter progressivement la température dans la zone de travail. Cette élévation thermique permet d'obtenir un volume de matière suffisamment plastifié, condition essentielle pour assurer un bon écoulement du matériau lors de la phase suivante. La durée de cette étape dépend des propriétés du matériau, de l'épaisseur des pièces ainsi que des conditions opératoires [40].

Le processus se poursuit ensuite par la phase active de soudage, durant laquelle l'outil se déplace le long du joint. Sous l'effet combiné de la rotation et de l'avance, le matériau plastifié est entraîné de l'avant vers l'arrière du pion, subissant des phénomènes d'extrusion et de forgeage. Ce brassage

intense permet d'obtenir une liaison homogène, caractérisée par l'absence de défauts typiques des procédés de fusion tels que la porosité ou les fissurations à chaud [35].

Enfin, une fois le parcours de soudage achevé, l'outil est retiré de la zone traitée. Cette opération marque la fin du procédé et laisse généralement une empreinte circulaire au niveau de la zone de sortie. Selon les exigences de l'application, ce défaut peut être corrigé par des opérations de finition ou par l'utilisation d'outils spécifiques à pion rétractable [26,40].

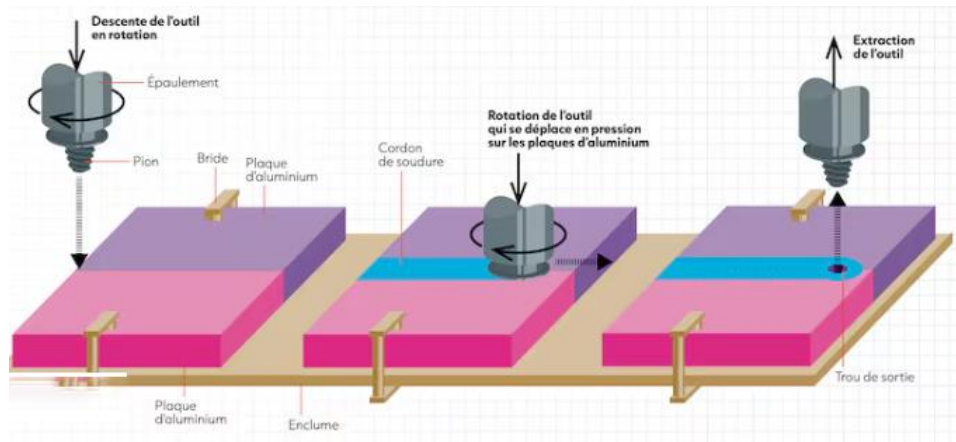


Figure I-17: Principe de FSW [37]

I.4.4 Typologie des joints de soudure en 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 :

- ❖ **Joint en Bout (Butt Joint) :** C'est la configuration la plus classique où les deux segments sont alignés dans le même plan. L'outil pénètre précisément à l'interface des deux bords pour générer un brassage symétrique de la matière [38,39]
- ❖ **Configurations Angulaires (T-joint et Corner Joint) :** Ces géométries permettent de lier des éléments perpendiculaires ou inclinés. L'outil suit une trajectoire le long de l'arête interne ou de l'intersection des plans, transformant l'énergie de friction en une liaison structurelle robuste, particulièrement utile dans les cadres de renforcement [40]
- ❖ **Assemblage par Recouvrement (Lap Joint) :** Ici, les pièces sont superposées. La soudure s'effectue par la pénétration du pion à travers la plaque supérieure jusqu'à la plaque

inférieure, créant une liaison à l'interface des deux surfaces. La largeur du cordon est alors tributaire de l'épaisseur des constituants..[41]

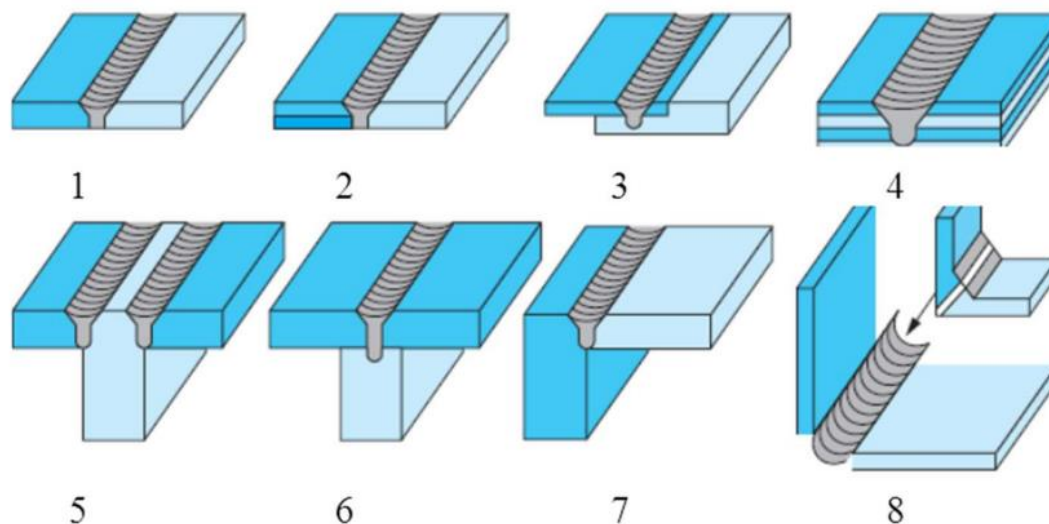


Figure I-18: Configurations de joints pour le soudage par friction malaxage : (1 2) bout à bout, (3) transparence. (4) transparence multiple, (5) en T, (6) T par transparence , (7) coin , et (8) angle [42]

I.4.5 Les Paramètres Opératoires Du Soudage FSW

Les paramètres du procédé et la géométrie de l'outil sont des éléments décisifs de la qualité de la soudure. Les paramètres du procédé sont la vitesse d'avance, la vitesse de rotation ainsi que la force de forgeage exercée sur l'outil FSW. Ils sont dépendants de la nature des matériaux à souder, de l'épaisseur des pièces à souder, de la géométrie et du matériau de l'outil et du procédé, c'est-à-dire de la machine de soudage. Ils ont une influence sur les efforts engendrés, la génération de chaleur et la qualité de la soudure (compacité et défauts).

- **La force de forgeage** ou **la profondeur de plongée** détermine le contact entre l'outil et la pièce. Ce sont deux paramètres importants car le contact conditionne le frottement qui est l'élément moteur de la soudure. Une fois le contact établi, la force a une influence sur la compacité de la soudure. Une force trop faible peut engendrer un manque de compacité de la soudure (film d'oxydes mal broyés, porosités ...). Au contraire une force trop grande crée des bavures le long du joint de soudure.[43]

- Concernant la cinématique de l'outil, **la vitesse d'avance** est une donnée caractéristique de la soudure. A vitesse de rotation fixée, plus la vitesse de soudage est grande, plus il sera difficile de souder correctement les pièces, et plus le risque de créer des défauts de types trous tunnels est

grand. Plus la vitesse de rotation augmente et plus le matériau s'échauffe (et plus le frottement décroît car le matériau devient plus liquide). Si elle est trop importante la soudure peut alors être trop chaude et le matériau peut atteindre son point de fusion, ce qui engendrera une dégradation plus importante des propriétés mécaniques de l'assemblage. Les deux vitesses sont liées et nous regardons généralement le rapport entre la vitesse d'avance et celle de rotation pour qualifier la soudure ; un rapport trop élevé engendre un manque d'apport d'énergie.[43]

*{Dans le cas spécifique des polymères comme le **PEHD**, l'équilibre entre la vitesse de rotation et d'avance est d'autant plus critique que la faible conductivité thermique du matériau favorise une accumulation de chaleur locale «risquant ainsi de dégrader la zone de soudure par surchauffe}*

- **La géométrie de l'outil** est également un paramètre important dans l'obtention d'une bonne soudure. Elle est continuellement optimisée au travers de l'utilisation de filets, de gorges, et de différentes formes de pions. La longueur du pion est une grandeur influente ; en effet elle doit permettre de malaxer suffisamment la matière sans percer les plaques. Elle est principalement définie par l'expérience. Dans (Gemme et al. 2011), les auteurs ont optimisé cette grandeur en effectuant des tests de pliage sur des échantillons prélevés sur les tôles soudées. Lorsque la distance entre le bas du pion et le bas de la tôle est inférieure à 0,2 mm (pour une épaisseur de tôle de 2,3 mm), les joints soudés sont généralement corrects. L'utilisation de la simulation peut permettre d'optimiser la géométrie de l'outillage.[43]

I.5 Techniques de réparation des polymères

I.5.1 Réparations conventionnelles

Les méthodes traditionnelles de réparation des polymères comme le PEHD reposent principalement sur deux approches techniques :

- **Le soudage thermique (Fusion) :** C'est la méthode la plus répandue. Elle inclut le soudage au gaz chaud, ou par miroir chauffant. Le principe consiste à chauffer les bords de la fissure jusqu'à l'état visqueux et à apporter une matière d'apport (baguette de soudage) pour combler le défaut.



Figure I-19: le soudage par extrusion du polymères [44]

- **Le collage par adhésifs :** Utilisation de résines époxy ou de colles cyanoacrylates. Bien que simple à mettre en œuvre, cette méthode est limitée par la faible énergie de surface du PEHD (caractère apolaire), ce qui nécessite des traitements de surface chimiques ou physiques complexes pour garantir l'adhérence.[45]



Figure I-20: Le collage par adhésifs (colles) [46]

I.5.2 Limites des méthodes classiques

Bien que largement utilisées, ces techniques présentent des inconvénients majeurs pour les structures critiques :

Zones Affectées par la Chaleur (ZAC) : Le passage par l'état liquide modifie radicalement la microstructure semi-cristalline. Le refroidissement crée des zones de fragilité où la résistance mécanique est inférieure à celle du matériau de base.

Oxydation Thermique : La fusion à l'air libre dégrade les chaînes moléculaires par oxydation, ce qui réduit la durée de vie de la réparation face au vieillissement.

Contraintes Résiduelles : Les cycles de chauffage et de refroidissement rapide génèrent des tensions internes (contraintes thermiques) qui favorisent l'amorçage de nouvelles fissures en fatigue.[11]

I.5.3 Avantages de la réparation par le soudage FSW

La réparation par voie solide, via le procédé de Soudage par Friction-Malaxage (FSW), offre une alternative révolutionnaire aux limites du soudage par fusion :

- **Absence de fusion :** Le matériau est malaxé à une température inférieure à son point de fusion ($T < T_m$). Cela évite la dégradation thermique, la formation de porosités et l'oxydation des chaînes polymères.
- **Recristallisation et affinement structurel :** L'action mécanique de l'outil rotatif provoque une rupture et une recombinaison des chaînes moléculaires. Ce brassage intense crée une zone de mélange homogène avec une structure cristalline affinée.
- **Rendement de joint élevé :** Contrairement au simple comblage, le FSW "efface" physiquement la fissure en soudant les parois de la fracture par malaxage plastique. Les propriétés mécaniques obtenues sont souvent supérieures à celles obtenues par les méthodes de soudage thermique conventionnelles [23]

I.5.4 Limites et Inconvénients techniques

- **Force axiale élevée :** Le maintien de l'outil en contact avec la pièce nécessite une pression verticale importante, ce qui impose d'avoir un système de fixation (clamping) rigide pour éviter la déformation des structures creuses comme les tubes.
- **Trou de sortie (Exit Hole) :** À la fin de l'opération de réparation, le retrait du pion laisse un trou dans la matière. Pour les structures devant être étanches, ce défaut nécessite une étape de finition supplémentaire ou l'utilisation d'outils rétractables coûteux.
- **Vitesse de soudage :** Bien que performant, le FSW peut être plus lent que certaines méthodes thermiques automatisées en raison de la nécessité de maintenir une température de friction stable sans atteindre la fusion.
- **Accessibilité géométrique :** L'encombrement de la tête de soudage rend difficile l'accès aux zones exiguës, aux angles vifs ou aux structures de géométrie très complexe.

Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de dresser un panorama global des matériaux polymères, en mettant l'accent sur le **Polyéthylène Haute Densité (PEHD)** en raison de son importance stratégique dans les applications industrielles telles que le transport de fluides sous pression. Nous avons mis en évidence que, malgré ses excellentes propriétés physico-chimiques, le PEHD reste vulnérable à des mécanismes d'endommagement complexes, notamment le phénomène de **crazing** et la **croissance lente de fissures (SCG)**, qui compromettent l'intégrité structurelle des installations à long terme.

L'analyse des techniques de maintenance a révélé les limites des méthodes de **réparation** conventionnelles par fusion, souvent responsables d'une dégradation thermique de la microstructure et de l'apparition de contraintes résiduelles préjudiciables. Face à ces enjeux, **le soudage par friction-malaxage (FSW)** émerge comme une solution innovante et performante. En opérant à l'état solide, ce procédé permet non seulement d'effacer physiquement les défauts sans altérer les propriétés intrinsèques du polymère, mais assure également une continuité structurelle supérieure.

Cette étude bibliographique constitue le socle nécessaire à la compréhension des phénomènes physiques en jeu. Elle justifie l'orientation de nos travaux vers l'optimisation du procédé FSW, qui fera l'objet d'une analyse détaillée dans le chapitre suivant, tant sur le plan des paramètres opératoires que sur celui de la caractérisation expérimentale des zones réparées.

Chapitre II : méthode des plans d'expériences

II méthode des plans d'expériences

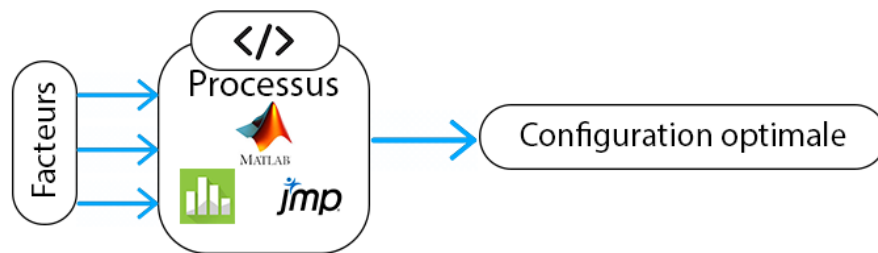
Introduction

Le passage vers une production industrielle intelligente nécessite des outils capables de transformer des essais expérimentaux en modèles prédictifs robustes. Ce second chapitre est dédié à l'application de la méthode des Plans d'Expériences (MPE) dans le cadre de notre étude sur le PEHD. En structurant l'analyse des paramètres d'influence de manière logique, cette approche permet de maximiser la pertinence des résultats obtenus avec une économie de ressources significative. L'objectif est de présenter un cadre méthodologique rigoureux, allant de la sélection des facteurs jusqu'à l'interprétation des interactions complexes qui régissent le comportement du matériau traité par FSW

II.1 Plan d'expériences:

II.1.1 Définition

MPE est le terme utilisé pour décrire l'optimisation des expériences d'un point de vue statistique, rendant leur conception et leur analyse plus efficaces. Cette approche suit la méthode de conception d'expériences (MPE). La technique vise à examiner l'impact de diverses variables indépendantes grâce à une méthode systématique et rigoureuse exécutée simultanément. Bien que l'UFAT étudie les effets de différentes variables sur des facteurs spécifiques, la MPE peut aider à minimiser l'expérimentation tout en continuant à connaître les interactions potentielles entre les facteurs étudiés. [47] Matlab, Minitab et jmp sont des options logicielles appropriées pour effectuer ces analyses. [48]



Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

II.1.2 Vocabulaire de Base des Plans d'Expériences

Comprendre la méthodologie des plans expérimentaux nécessite la maîtrise d'un ensemble de concepts et de termes fondamentaux.

- a) **La Réponse Expérimentale** : Il s'agit du paramètre de sortie permettant de quantifier la performance du système. Dans notre étude, elle se traduit principalement par la **résistance mécanique** des joints en PEHD, complétée par des analyses qualitatives de la zone de mélange.
- b) **Les Facteurs d'Influence** : Ce sont les variables d'entrée du procédé FSW. On distingue les facteurs maîtrisables (vitesse de rotation, avance de l'outil) que l'expérimentateur ajuste délibérément, et les facteurs aléatoires qui introduisent une variabilité naturelle. Ces paramètres sont codés numériquement pour simplifier l'analyse de leurs effets.[49]

Quels sont les niveaux et les domaines d'études ?

Les conceptions expérimentales impliquent d'examiner chaque facteur de **-1** à **+1**, qui est ensuite utilisé pour définir sa plage de variation. Le domaine de recherche expérimentale est un espace à **k** dimensions qui englobe l'ensemble des plages de variation de tous les **m** facteurs, chaque point représentant des paramètres variables.

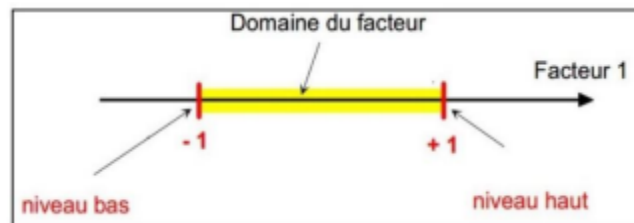


Figure II-1:Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs [50]

Un axe perpendiculaire au deuxième facteur crée un cadre de référence cartésien qui définit l'espace expérimental, à savoir l'espace euclidien

L'influence d'un facteur est indiquée par le changement d'ampleur de sa réponse à mesure qu'il passe d'un niveau bas à un niveau élevé. i. La relation entre deux variables est la somme de leurs

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

effets interdépendants sur la réponse du système, et sa valeur numérique représente le nombre de facteurs impliqués moins un.

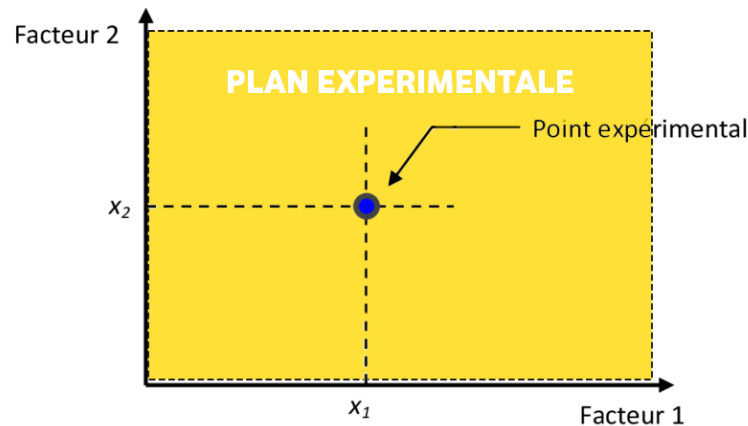


Figure II-2: L'espace et le point expérimental [51]

II.1.3 Les Étapes des Plans d'Expériences

La mise en œuvre d'une stratégie de plans d'expériences ne se résume pas à un simple calcul statistique, mais suit un protocole rigoureux structuré en plusieurs étapes interdépendantes. [52]

Initialement, la démarche s'amorce par une **Fixation des objectifs** où les buts de l'étude sont clairement définis et hiérarchisés. Cette étape est cruciale car elle permet de distinguer les finalités globales du projet des indicateurs de performance spécifiques à atteindre. Une fois ces cibles établies, l'attention se porte sur le **Définition des variables du système**. À ce stade, il s'agit de recenser les variables d'influence (facteurs) et de fixer leurs limites d'évolution (niveaux), tout en s'assurant de la faisabilité technique de chaque configuration envisagée.

L'étape suivante consiste en la **Conception du plan expérimental**. C'est ici que l'expérimentateur sélectionne l'architecture matricielle la plus adaptée (qu'elle soit factorielle, fractionnée ou de surface de réponse) afin de maximiser la pertinence des données recueillies sous contrainte de ressources limitées. Pour garantir l'impartialité des résultats et minimiser l'impact des biais extérieurs, les essais sont ensuite **ordonnés**, souvent de manière aléatoire, renforçant ainsi la robustesse statistique de l'analyse. [53]

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

Enfin, la démarche aboutit à la **phase exécutive**, où les tests sont conduits dans le respect strict du protocole établi, permettant une collecte de données méticuleuse indispensable à la phase ultérieure d'interprétation

II.1.4 Les Types de Plans d'Expériences

Il existe plusieurs types de plans d'expériences, classés en fonction de leur complexité et des objectifs recherchés. Voici les principaux :

a) Plans factoriels : Les plans factoriels permettent d'étudier plusieurs facteurs simultanément en testant différentes combinaisons de leurs niveaux. On peut notamment citer :

- **Les plans factoriels complets** : ils étudient tous les croisements possibles des niveaux de chaque facteur. Ils permettent d'obtenir une étude exhaustive mais s'avèrent coûteux en raison du nombre élevé d'essais.
- **Les plans factoriels fractionnaires** : ils n'étudient qu'une partie des croisements. Ils permettent de dégager les effets principaux et certaines interactions tout en limitant considérablement le nombre d'expériences[54].

b) Méthode des surfaces de réponse (RSM - Response Surface Methodology) : Ces plans sont utilisés pour modéliser et optimiser une réponse en fonction de plusieurs variables d'entrée. Ils comprennent :

- **Les plans de Box-Behnken** : ils permettent de limiter le nombre d'expériences en évitant les combinaisons extrêmes des niveaux des facteurs.
- **Les plans composites centrés (CCD - Central Composite Design)** : ils ajoutent des points centraux et des points "étoiles" pour mieux estimer la courbure de la surface de réponse et optimiser plus précisément le processus[55,56]

c) Plans de mélange (Mixture Designs) : Ces plans sont spécialement conçus pour étudier l'influence des proportions de différents composants dans un mélange, comme c'est le cas pour les formulations chimiques, les alliages ou les polymères. Contrairement aux autres types de plans, les proportions des composants sont soumises à une contrainte : leur somme doit être constante, généralement égale à 1 (ou 100 %) [57].

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

d) Plans de Taguchi : Cette méthode repose sur l'emploi de matrices orthogonales pour optimiser les processus avec un minimum d'essais. Elle vise à améliorer la qualité et la robustesse des produits et procédés en minimisant l'impact des facteurs de bruit (variables non maîtrisées de l'environnement). Elle est particulièrement utilisée dans l'industrie pour garantir une production stable et performant [49].

e) Plans de Criblage (Screening Designs)

Destinés à identifier les facteurs les plus influents parmi un grand nombre de variables potentielles, ces plans sont utilisés essentiellement en phase préliminaire d'étude. On distingue notamment les plans de Plackett-Burman, qui optimisent le nombre d'essais en identifiant rapidement les facteurs significatifs, et les plans de Taguchi de criblage, basés sur des matrices orthogonales permettant une analyse efficace des effets principaux avec un nombre restreint d'expériences [58].

f) Plans Optimaux (Optimal Designs)

Ces plans sont générés de manière algorithmique en fonction des contraintes spécifiques et des objectifs particuliers de l'expérimentation. Les plans D-optimaux minimisent l'incertitude associée aux coefficients du modèle statistique, maximisant ainsi la précision des estimations. Les plans I-optimaux, quant à eux, sont conçus pour minimiser l'erreur de prédiction sur l'ensemble du domaine expérimental, offrant ainsi des résultats plus précis et fiables [59].

Afin d'offrir une vision globale et comparative de ces différentes configurations, le **Tableau (II.X)** synthétise les caractéristiques, les avantages majeurs ainsi que les domaines d'application de chaque type de plan d'expériences."

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

Tableau II-1 : Principaux types de plans d'expériences et leurs caractéristiques

Type de plan	Caractéristiques principales	Application en réparation polymère
Plans factoriels complets $2k$	Toutes combinaisons de niveaux ; analyse exhaustive des interactions	Nombre réduit de facteurs ($k \leq 4$) ; identification des effets principaux et interactions
Plans factoriels fractionnaires $2k-p$	Fraction de la matrice complète ; moins d'essais mais confounding	Grand nombre de facteurs en phase exploratoire
Plans de Doehlert	Distribution uniforme dans l'espace ; efficacité rotationnelle	Optimisation de procédés thermiques ou de mise en forme
Plans Box-Behnken / CCD	Points centraux et étoilés ; capture la courbure (modèle du 2eme degré)	Modélisation RSM des propriétés mécaniques du joint réparé
Plans de Taguchi	Matrices orthogonales L9, L18... ; robustesse aux bruits	Contrôle qualité industriel de la réparation
Plans de Plackett-Burman	Criblage : k facteurs en $k+1$ essais	Phase de screening initial (polymère, température, pression...)

II.1.5 Apports de la méthodologie DOE

L'adoption des plans d'expériences offre une plus-value stratégique dans l'étude des systèmes complexes. Cette rigueur statistique permet avant tout de **rationaliser l'effort expérimental**, garantissant ainsi un gain substantiel en temps et en budget. Au-delà de l'économie de ressources, cette approche excelle dans la **détection des interactions synergiques** entre les variables, là où les méthodes classiques échouent. En somme, elle transforme des données brutes en un **outil de décision prédictif**, particulièrement pertinent pour les procédés innovants comme le soudage FSW des structures polymères.

II.1.6 Objectif de la Modélisation

L'utilisation des modèles mathématiques issus des plans d'expériences ouvre un large champ de possibilités analytiques et s'adapte à une multitude d'objectifs, en fonction des besoins et des exigences propres à chaque étude

Capacité Prédictive : Le modèle agit comme un simulateur capable d'estimer la réponse du système (ex: résistance du PEHD) en tout point de l'espace expérimental. La visualisation de ce comportement se traduit par **la Surface de Réponse**, une cartographie 3D des performances.

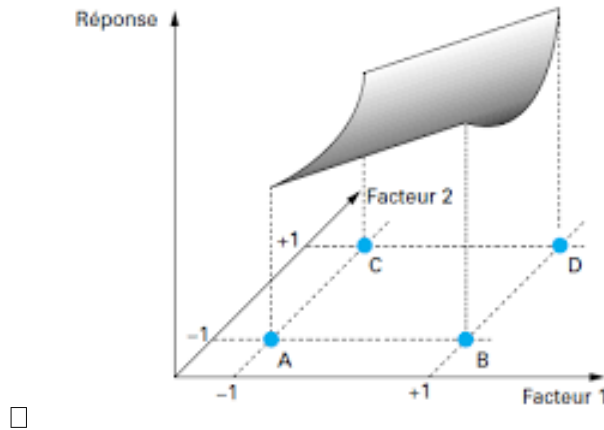


Figure II-3: La surface de réponse

- c) **Convergence vers l'Optimum** : L'enjeu majeur est d'identifier le 'Point Idéal'. Il s'agit d'ajuster les leviers d'entrée (N, v, F) pour satisfaire des critères de qualité rigoureux tout en minimisant les dérives de production [60]

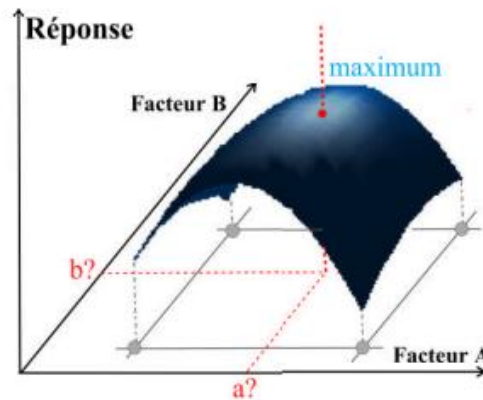


Figure II-4: exemple graphique sur l'optimisation de la réponse

II.1.7 Fondements de la Modélisation Mathématique

La transition d'une approche purement expérimentale vers une analyse prédictive repose sur la construction d'un modèle mathématique robuste. Dans le cadre de la méthodologie des plans d'expériences (MPE), nous adoptons une structure polynomiale pour approximer la réponse réelle du système.

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

- a) **Postulat du Modèle Polynomial** En nous appuyant sur le développement en série de Taylor, nous postulons que le comportement thermique et mécanique du soudage FSW peut être fidèlement représenté par une équation de second degré

$$Y = a_0 + \sum X_i a_i + \sum X_i X_j a_{ij} + \sum X_i^2 a_{ii} + e$$

Où :

Y (Réponse) : Désigne la grandeur physique mesurée avec précision (ex : résistance à la traction).

X_i (Niveaux) : Représentent les facteurs d'entrée ajustés par l'expérimentateur, considérés comme des variables indépendantes sans erreur de régression.

a₀, a_i, a_{ij}, a_{ii} (Coefficients) : Sont les poids statistiques estimés à partir des données réelles. Ils quantifient l'impact direct, l'interaction et la courbure de chaque paramètre.

e (Résidu) : Symbolise l'écart global, englobant à la fois l'erreur expérimentale et le manque d'ajustement du modèle

b) Standardisation via les Variables Codées

Pour s'affranchir de la disparité des unités de mesure et permettre une comparaison rigoureuse des effets, nous avons recours à une transformation adimensionnelle. Cette normalisation centre et réduit chaque facteur dans un domaine standardisé compris entre -1 et +1[61]

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{umin_i + umax_i}{2}\right)}{\left(\frac{umax_i - umin_i}{2}\right)}$$

Où

: • **x_i** est la valeur codée du facteur

• **u_i** est la valeur réelle du facteur.

• **umin_i** est la valeur minimale du facteur.

• **umax_i** est la valeur maximale du facteur.

II.2 Méthode de Plan factoriel complet

Définition

Le plan factoriel complet s'impose comme une stratégie d'expérimentation exhaustive visant à quantifier l'influence simultanée de plusieurs variables d'entrée sur une réponse spécifique. Contrairement aux approches classiques qui étudient un seul facteur à la fois, cette méthode permet de cartographier avec précision les **interactions croisées** entre les différents paramètres au sein d'un espace de recherche délimité. Sur le plan structurel, cette configuration repose sur l'exécution systématique de toutes les associations possibles entre les niveaux des facteurs. Mathématiquement, l'envergure de la matrice expérimentale, notée N , est dictée par la loi de puissance suivante :

$$N = 2^k$$

Dans cette relation, k symbolise le nombre total de variables indépendantes intégrées à l'étude, chaque facteur étant évalué sur deux niveaux. Cette approche garantit une couverture totale du domaine d'étude, offrant ainsi une base de données robuste pour la modélisation statistique et l'optimisation du procédé

{Dans notre cas particulier, l'application d'un plan 2^k permettra d'établir une cartographie précise du comportement du PEHD sous l'effet des paramètres cinématiques du FSW}

II.2.1 Plan factoriel a deux niveaux

Dans l'optique d'optimiser notre processus de soudage FSW, nous avons opté pour une configuration factorielle binaire. Ce choix méthodologique repose sur la modulation de chaque paramètre d'entrée entre deux bornes extrêmes, codées numériquement par les niveaux -1 et +1. L'intérêt majeur de cette approche réside dans sa capacité à extraire des coefficients d'influence précis pour chaque facteur, tout en révélant la complexité des interactions mutuelles. Bien que cette structure soit parfaitement adaptée à la modélisation linéaire de notre système, il convient de noter qu'elle privilégie l'efficacité expérimentale au détriment de la détection de phénomènes de non-linéarité (courbure) au sein du domaine d'étude [62]

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

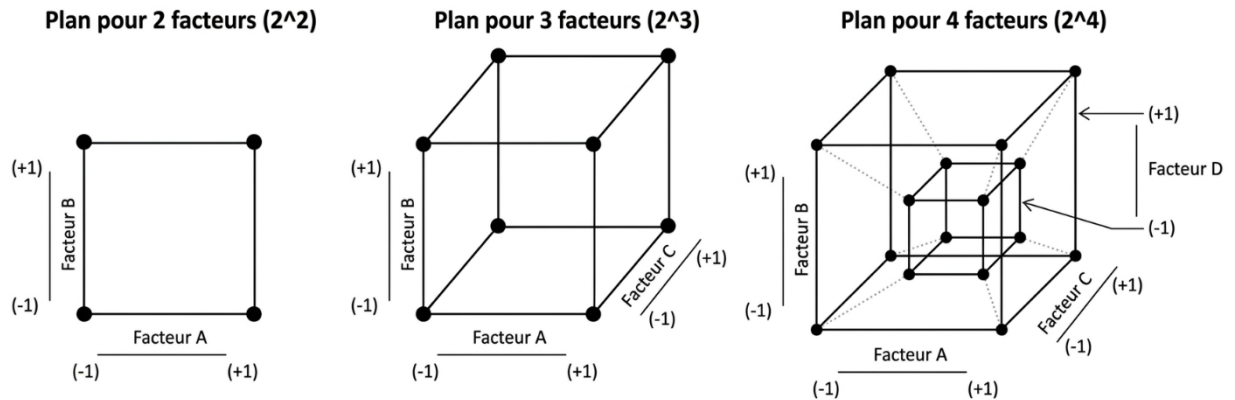


Figure II-5: Plans factoriels complets 2^2 2^3 2^4 [63]

II.2.2 Constitution du Plan Factoriel Complet

❖ Matrice d'Expériences

Une matrice d'expériences regroupe l'ensemble des combinaisons possibles des niveaux haut (+1) et bas (-1) de chaque facteur d'entrée. Par exemple, une étude portant sur deux facteurs nécessite quatre essais. Plus le nombre de facteurs augmente, plus le nombre d'expériences croît exponentiellement : un plan 2^K avec sept facteurs requiert ainsi 128 essais. Pour limiter ce nombre d'essais tout en conservant la possibilité d'analyser tous les facteurs, on fait alors appel aux plans factoriels fractionnaires à deux niveaux. Une matrice d'expériences peut être construite manuellement en s'appuyant sur l'algorithme de Yates, qui suit un schéma d'alternance systématique des valeurs [64]. Les tableaux suivants illustrent ce principe pour les plans 2^2 et 2^3

Tableau II-2 : Matrice d'un plan 2^2

Exp	X_1	X_2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

Tableau II-3: 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

La finalité de la matrice d'expériences est de postuler une fonction mathématique capable de modéliser le comportement de la réponse (dans notre cas, les propriétés mécaniques du joint soudé FSW) en fonction des facteurs codés **X_i**. Selon la complexité du phénomène et le degré de précision recherché, trois niveaux de modélisation peuvent être envisagés :

- **Modèle Linéaire de Premier Degré (Sans interactions) :** Dans le cas le plus simple, on suppose que chaque paramètre cinématique agit de manière indépendante sur la réponse, sans influence mutuelle. Ce modèle additif de premier degré s'exprime par :

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

Où **a₀** représente l'effet moyen théorique au centre du domaine expérimental, et **a_i** désigne l'effet principal du facteur **x_i**

2. Modèle avec Interactions de Second Ordre : En réalité, lors du soudage FSW, les paramètres interagissent fortement entre eux (par exemple, l'effet de la vitesse de rotation **N** dépend étroitement de la vitesse d'avance **V_f**). Pour capturer ces effets combinés, le modèle intègre les coefficients d'interaction bilinéaire

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

II-1

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

Dans le cadre de notre plan factoriel complet 2^k , c'est ce modèle polynomial qui sera exploité pour générer les équations prédictives de la résistance à la traction R_m et de la micro dureté de nos échantillons en PEHD.

❖ Évaluation des Effets Principaux et des Interactions

pour exploiter mathématiquement les résultats issus de la matrice d'expériences, il est fondamental de quantifier l'influence de chaque paramètre sur la réponse. Prenons l'exemple d'un plan factoriel complet 2^3 dédié à l'étude de 3 facteurs X_1 , X_2 et X_3 , dont la structure et les réponses expérimentales Y_i sont synthétisées dans le **Tableau (II.4)**

Tableau II-4: Matrice d'expériences et réponses pour un plan complet 2^3

Essai	X1	X2	X3	Réponse
1	-1	-1	-1	Y1
2	+1	-1	-1	Y2
3	-1	+1	-1	Y3
4	+1	+1	-1	Y4
5	-1	-1	+1	Y5
6	+1	-1	+1	Y6
7	-1	+1	+1	Y7
8	+1	+1	+1	Y8

À partir de cette matrice, deux types d'effets statistiques sont calculés :

- **Les Effets Moyens Niveaux d'un Facteur :**

Pour le facteur X_1 (par exemple, la vitesse de rotation de l'outil N) :

$$\bar{a}_1^- = \frac{Y1+Y3+Y5+Y7}{4} \quad \bar{a}_1^+ = \frac{Y2+Y4+Y6+Y8}{4}$$

Pour le facteur X_2 (par exemple, la vitesse d'avance V_f) :

$$\bar{a}_2^- = \frac{Y1+Y2+Y5+Y6}{4} \quad \bar{a}_2^+ = \frac{Y3+Y4+Y7+Y8}{4}$$

Pour le facteur X_3 (par exemple, l'angle d'outils θ) :

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

$$\bar{a}_3^- = \frac{Y1+Y2+Y3+Y4}{4} \quad \bar{a}_3^+ = \frac{Y5+Y6+Y7+Y8}{4}$$

- **Effet Global (Principal) d'un Facteur :**

L'effet global d'un paramètre cinématique correspond à la variation moyenne de la réponse (résistance à la traction **Rm** lorsque ce facteur passe de son niveau bas -1 à son niveau haut +1. Dans un plan orthogonal et équilibré, cet effet est défini par la différence entre la moyenne des réponses au niveau haut et la moyenne au niveau bas

$$Effet\ Global(\bar{a}_1) = \bar{a}_1^+ - \bar{a}_1^- \quad et \quad a_1 = \frac{Effet\ Global(\bar{a}_1)}{2}$$

$$a_1 = \frac{\bar{a}_1^+ - \bar{a}_1^-}{2} = \frac{Y2+Y4+Y6+Y8 - (Y1+Y3+Y5+Y7)}{8}$$

$$a_2 = \frac{\bar{a}_2^+ - \bar{a}_2^-}{2} = \frac{Y3+Y4+Y7+Y8 - (Y1+Y2+Y5+Y6)}{8}$$

$$a_3 = \frac{\bar{a}_3^+ - \bar{a}_3^-}{2} = \frac{Y5+Y6+Y7+Y8 - (Y1+Y2+Y3+Y4)}{8}$$

Ces coefficients permettent de classer rigoureusement les paramètres de soudage FSW par ordre d'importance selon leur impact direct sur la qualité de la liaison en PEHD.

- **Évaluation des Effets d'Interaction :**

Théoriquement, pour introduire une interaction (par exemple entre la vitesse de rotation x_1 , la vitesse d'avance x_2 et l'angle d'outil x_3 dans la matrice d'expériences, des nouvelles colonnes algébrique est construite. Les éléments de ces colonnes sont obtenus en multipliant, ligne par ligne, les signes correspondants des variables impliquées « $x_1.x_2$ » « $x_1.x_3$ » « $x_2.x_3$ » et la colonne moyenne est calculée par la formule suivante :

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N} = \frac{Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Y6+Y7+Y8}{8}$$

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

Tableau II-5 : Matrice d'expérience avec effets pour un plan factoriel complet 2^3

Exp	Moyenne	x_1	x_2	x_3	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	Réponse (Y_i)
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	Y1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	Y2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	Y3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	Y4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	Y5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	Y6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y8
Effet a_i	a_0	a_1	a_2	a_3	I_{12}	I_{13}	I_{23}	

II.3 Régression Linéaire Multiple et Validation du Modèle

II.3.1 Estimation des Coefficients par la Méthode des Moindres Carrés

Une fois la matrice d'expériences X constituée et les réponses Y mesurées, les coefficients du modèle sont estimés en minimisant la somme des carrés des résidus. En notation matricielle, le modèle s'écrit : [65,66]

$$Y = X \cdot a + e$$

$$\begin{bmatrix} Y1 \\ Y2 \\ \vdots \\ Yn \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}$$

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

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

*L'estimateur des moindres carrés ordinaires (MCO) donne l'unique solution :

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}$$

Où $\mathbf{X}^T$ est la transposée de la matrice du plan, et $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ sa matrice d'information inverse. L'orthogonalité du plan garantit que $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ est diagonale, ce qui simplifie considérablement l'inversion et rend chaque coefficient $\hat{a}_i$ directement égal à la projection de $\mathbf{Y}$ sur la colonne correspondante de $\mathbf{X}$, divisée par N [66]

II.3.2 Analyse de Variance (ANOVA) — Test de Fisher

Afin d'évaluer la pertinence statistique des facteurs d'entrée sur la réponse mesurée, l'analyse de la variance (ANOVA) est mise en œuvre. Cette méthode consiste à comparer la fluctuation mathématique propre à chaque facteur vis-à-vis de la variance résiduelle du système. Si un paramètre s'avère non significatif, son impact est alors assimilé par le bruit de fond (la variance résiduelle). La significativité globale de l'ajustement du modèle est rigoureusement examinée par le test F de Fisher-Snedecor. Néanmoins, pour discerner l'importance relative et individuelle de chaque interaction et effet principal, le recours au test t de Student s'avère indispensable [67]

La décomposition de la variance totale des réponses en une part expliquée par le modèle et une part résiduelle constitue le fondement de l'ANOVA. Cette décomposition se formule comme suit :

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

Telque :

STCE : Somme Totale des Carrés des Écarts , après correction, pour Y

SCEL : Somme des Carrés des Écarts dus à la Liaison défini par le modèle suivant

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

SCER : Somme des Carrés des Écarts des Résidus a somme globale des différences au carré de tous les résidus

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

- Y_i Représente les valeurs de réponse réelle
- Y_{moy} est la valeur moyenne de ces réponses observées.

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

- *Yi* est désigne les valeurs de réponse prédites ou estimées en utilisant le modèle en question

La quantification de la variance associée à chaque composante du modèle statistique s'effectue à travers le calcul des Carrés Moyens (**CM**). Cette opération consiste à normaliser chaque somme des carrés (**SCE**) en la divisant par son degré de liberté (**ddl**) respectif, reflétant ainsi le nombre d'observations indépendantes ou de paramètres ajustés. Les trois indicateurs cardinaux de cette variance sont définis comme suit :

- **Le Carré Moyen de la Liaison (CML) :** Il exprime la part de variance expliquée par le modèle d'interaction. Il est associé à $(p - 1)$ degrés de liberté (où p désigne le nombre total de coefficients estimés). À titre d'illustration, pour un modèle à 5 coefficients, ce terme disposera de 4 degrés de liberté.
- **Le Carré Moyen des Résidus (CMR) :** Il évalue la variance du bruit de fond ou de l'imprécision expérimentale. Ses degrés de liberté sont définis par la relation $(N - p)$ (où N est le nombre total d'essais réalisés). Ainsi, pour une matrice comprenant **100** expériences et **6** coefficients, le terme résiduel possédera rigoureusement **94** degrés de liberté.
- **Le Carré Moyen Total (CMT) :** Il synthétise la dispersion globale des réponses mesurées. Il est régi par $(n - 1)$ degrés de liberté, ce qui correspondrait à 99 degrés de liberté pour un plan à 100 essais.

L'ensemble de ces articulations mathématiques est synthétisé de manière conventionnelle dans le tableau d'analyse de la variance (**ANOVA**) structuré ci-dessous : [68]

Tableau II-6: Tableau ANOVA [68]

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport F
<i>Liaison (modèle)</i>	<i>SCEL</i>	$p - 1$	$CML = \frac{SCEL}{(p - 1)}$	$F_{cal} = \frac{CML}{CMR}$
<i>Résidus (erreur)</i>	<i>SCER</i>	$n - p$	$CMR = \frac{SCER}{(n - p)}$	
<i>Total</i>	<i>STCE</i>	$n - 1$	$CMT = \frac{STCE}{(n - 1)}$	

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

Après l'établissement du tableau de l'ANOVA, la validation de la significativité globale du modèle de régression s'appuie sur une confrontation statistique rigoureuse entre la valeur calculée **Fcal** et la valeur critique théorique **Fcrit**. Cette démarche décisionnelle se déploie selon les étapes successives suivantes :

1. **Détermination du F observé (Fcal)** : Issu directement des calculs de l'ANOVA, il représente le rapport entre la variance expliquée par le modèle et la variance résiduelle.
2. **Extraction du F critique (Fcrit)** : Lu à partir des tables standards de Fisher-Snedecor en fonction du seuil de risque choisi (généralement $\alpha = 0.05$ ou 1%) et des degrés de liberté du numérateur ($\nu_1 = p-1$) et du dénominateur ($\nu_2 = n-p$)
3. **Règle de décision statistique** : La comparaison des deux grandeurs conduit à deux scénarios exclusifs qui dictent la validité du modèle :
 - **Premier Scénario** : Si $Fcal > Fcrit$ (Rejet de l'hypothèse nulle H_0)

Ce résultat atteste de la **validité statistique du modèle**. Il confirme qu'au moins un des paramètres technologiques x_i exerce une influence hautement significative sur la réponse géométrique ou mécanique Y . Les variations observées ne sont pas le fruit du hasard, mais sont gouvernées par le modèle établi.

- **Deuxième Scénario** : Si $Fcal \leq Fcrit$ (Acceptation de l'hypothèse nulle H_0)

Ce constat indique l'**invalidation du modèle de régression**. Mathématiquement, cela implique que les facteurs d'entrée x_i n'ont pas d'impact perceptible sur Y , ou que la structure mathématique choisie est inadéquate pour capturer la non-linéarité des phénomènes physiques observés (effet absorbé par le bruit de fond résiduel).[68]

II.3.3 Logiciels et Outils de Calcul

Bien que la structure théorique des plans d'expériences (2^k) réponde à des matrices universelles, l'optimisation d'un procédé d'ingénierie mécanique (tel que le soudage FSW) exige une configuration sur mesure, rigoureusement adaptée aux contraintes physiques et logistiques de l'étude. L'évaluation d'un modèle mathématique global dépasse le simple cadre de l'estimation numérique des coefficients. Si le recours à des tableurs standards (type Excel) reste théoriquement possible, il s'avère chronophage et source potentielle d'erreurs d'encodage lors du traitement des matrices inverses. C'est pourquoi l'intégration de progiciels spécialisés et de bibliothèques de calcul

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

avancées devient indispensable. Le tableau suivant synthétise les solutions logicielles majeures exploitées en recherche et en industrie, ainsi que les indicateurs de robustesse qu'elles permettent de générer instantanément :

Tableau II-7 : Synthèse des progiciels d'analyse de régression et leurs paramètres

Catégories d'outils)	Exemples de Logiciels / Bibliothèques	Indicateurs Statistiques Générés
Logiciels Dédiés (Clé en main)	Minitab JMP Statistica Modde Statgraphics	• Coefficients de détermination (R^2, $R^2_{ajusté}$) • Intervalles de confiance • Diagnostics des résidus • Valeurs p-value des tests F et t
Environnements de Programmation	Python(ScikitLearn, StatsModels) MATLAB	

Conclusion

En somme, ce deuxième chapitre a permis de poser les fondements théoriques et mathématiques de la Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE). Nous avons d'abord délimité la structuration du domaine expérimental, en mettant en relief la nature des variables d'entrée ainsi que les contraintes opératoires qui régissent le système. L'accent a ensuite été mis sur la rigueur de la modélisation mathématique, un jalon indispensable pour décoder les interactions complexes entre les paramètres du procédé

L'étude approfondie de la matrice générale, combinée aux tests de validation statistique tels que l'ANOVA (Fisher et Student), démontre que la MPE ne se limite pas à un simple outil d'ordonnancement des essais. C'est une stratégie d'optimisation globale qui rationalise le coût et le temps des campagnes expérimentales tout en maximisant la précision des modèles prédictifs.

Ainsi, l'arsenal méthodologique et logiciel validé tout au long de ce chapitre constitue le socle prédictif sur lequel repose notre investigation. Les outils statistiques présentés ici vont maintenant trouver leur application directe dans le chapitre suivant, dédié à l'analyse empirique, à la modélisation et à l'optimisation des paramètres de soudage par friction malaxage (FSW) de notre polymère à haute densité (PEHD).

Chapitre III : Résultats et discussions

III Résultats et discussions

Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous allons présenter, analyser et exploiter les résultats expérimentaux de notre étude sur le soudage par friction-malaxage (FSW) du polyéthylène haute densité (PEHD). Il s'agit essentiellement de modéliser quantitativement et donc prédire les relations existantes entre les paramètres de réalisation du procédé (la vitesse de rotation N et la vitesse d'avance V_f , l'angle d'outil θ et la température de la zone de travail T mesurée in-situ pendant l'opération de soudage)

En ingénierie des polymères, un des faits majeurs est que la température locale de panification de la pièce polymère dans la zone de malaxage conditionne le bon déroulement de la liaison soudée et ce DANS LA DEUXIEME par exemple là où on a une pièce réparée

Base de l'étude statistique que nous avons menée, les plans d'expériences 2^k présentés dans le chapitre précédent respectent cette contrainte. Il convient ici de rentrer plus en profondeur dans cet aspect en faisant appel au calcul des coefficients de régression des modèles et en restituant en détail les tests d'ANOVA (variabilité, Fisher, Student) qui permettent de valider un modèle statistique. C'est ici que nous pourrions en tirer des conséquences fortes sur les processus employés (contrôle, qualification pour la définition de fenêtre opératoire pour soudure et réparation de nos échantillons PEHD)

III.1 Dispositif expérimental et conduite des essais

Les analyses empiriques de ce projet de fin d'études (PFE) ont été réalisées tout au long des laboratoires de l'Université Belhadj Bouchaib d'Aïn Témouchent. Il s'agit d'une recherche portant sur la mise en œuvre du procédé de soudage par friction-malaxage (FSW *Friction Stir Welding*) pour la réalisation de joints et le recouvrement de lames en polyéthylène haute densité (PEHD). Si ce procédé a d'abord été développé pour les alliages métalliques, il commence à être repris par les industriels du plastique et ce, pour de nombreuses raisons telles que des économies d'énergie conséquentes, un soudage à l'état solide (pas de fusion du matériau) et un minimum de défauts usuels.

Chapitre III : Résultats et discussions

À titre expérimental, ces opérations de soudage ont été réalisées sur une fraiseuse conventionnelle de type **WBM20**. Celle-ci a été modifiée afin de pouvoir y monter les outils spéciaux du FSW. Dans le cadre d'une étude en plan d'expérience 2^3 que nous avons retenue, il a été décidé de procéder à 8 essais selon les combinaisons des paramètres de cette matrice testée. Trois variables ont alors été choisies pour piloter la réalisation des soudures : la vitesse de rotation de l'outil N , la vitesse d'avance Vf et l'angle d'inclinaison de la tige porte-outil $\emptyset$

En référence à la conductivité thermique du polyéthylène, chaque test a été suivi par pyrométrie. En effet, nous avons voulu suivre l'évolution de la température au cours de ces tests via un pyromètre permettant de mesurer des températures par inflation sur une surface inconnue. C'est cette donnée sur la température de la zone de soudage T qui est exploitée en entrée de notre modélisation de régression afin d'être ajustée.



Figure III-1: Dimensions géométriques (en mm) des plaques en PEHD préparées pour le soudage



Figure III-2:Vue générale de la fraiseuse conventionnelle (WBM20) utilisée pour les essais FSW

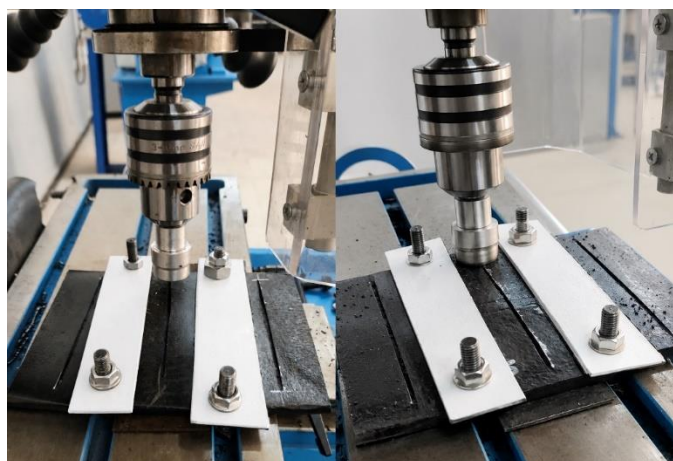


Figure III-3 : dispositif de fixation et montage de bridage des plaques en PEHD sur la table de la machine

Chapitre III : Résultats et discussions



Figure III-4 : Profils expérimentaux de l'évolution de la température enregistrée par le pyromètre

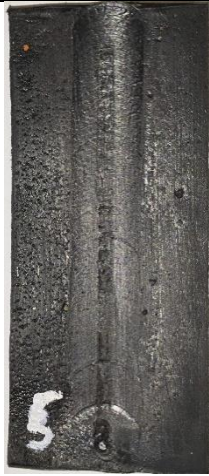
Dans le cadre de notre expérience, 8 essais ont été réalisés en faisant varier les paramètres de soudage. Pour chaque essai, la température a été mesurée en différents points spécifiques. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau III-1: résultat de l'expérience

<i>Essai</i>	<i>N (tr/min)</i>	<i>Vf (mm/min)</i>	<i>Ø (°)</i>	<i>Ti(C°)</i>	<i>Tf(C°)</i>	<i>T(C°)</i>
1	1395	15	6	106,3	109,4	107.85
2	1460	15	6	107,9	108,9	108.4
3	1395	25	6	105	108	106.5
4	1460	25	6	106	108	107
5	1395	15	9	107	107,5	107.25
6	1460	15	9	108,2	109,1	108.65
7	1395	25	9	108	108	108
8	1460	25	9	108,3	108,2	108.25

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III-2: Qualité de joint de soudure pour chaque essai

Essai	1	2	3	4
ZONE				
	1395 (<i>tr/min</i>) 15 (<i>mm/min</i>) 6°	1460 (<i>tr/min</i>) 15 (<i>mm/min</i>) 6°	1395 (<i>tr/min</i>) 25 (<i>mm/min</i>) 6°	1460 (<i>tr/min</i>) 25 (<i>mm/min</i>) 6°
Essai	5	6	7	8
ZONE				
	1395 (<i>tr/min</i>) 15 (<i>mm/min</i>) 9°	1460 (<i>tr/min</i>) 15 (<i>mm/min</i>) 9°	1395 (<i>tr/min</i>) 25 (<i>mm/min</i>) 9°	1460 (<i>tr/min</i>) 25 (<i>mm/min</i>) 9°

Chapitre III : Résultats et discussions

Pour passer à l'étape de programmation on donne des valeur binaire -1 / +1 a les valeur des paramètres de soudage (-1 pour la valeur inférieure et +1 pour la valeur supérieur) :

Tableau III-3: Valeurs des paramètres codés

<i>Essai</i>	<i>N (tr/min)</i>	<i>Vf (mm/min)</i>	<i>Ø (°)</i>	<i>T(C°)</i>
1	-1	-1	-1	107.85
2	+1	-1	-1	108.4
3	-1	+1	-1	106.5
4	+1	+1	-1	107
5	-1	-1	+1	107.25
6	+1	-1	+1	108.65
7	-1	+1	+1	108
8	+1	+1	+1	108.25

III.1.1 Formulation mathématique et approche matricielle du modèle

Afin d'établir une corrélation entre la réponse thermique globale et les variables opératoires de soudage (*N*, *Vf* et *Ø*), la réponse du système doit être modélisée par une expression polynomiale de premier degré avec interaction double. Ainsi, le modèle factoriel s'exprime mathématiquement de la manière suivante :

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

Dans le cadre de notre investigation, régie par l'ajustement de trois facteurs fondamentaux $k=3$ l'équation prédictive se décline comme suit :

$$y_i = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + I_{12} x_1 x_2 + I_{13} x_1 x_3 + I_{23} x_2 x_3 + e$$

Pour l'évaluation numérique des coefficients du modèle, le système d'équations est transposé sous une forme matricielle compacte. Cette configuration standardisée de la matrice d'expériences 2^3 fait correspondre les réponses observées *y_i* aux combinaisons des variables codées (-1 et +1) selon le formalisme suivant :

Chapitre III : Résultats et discussions

$$\begin{pmatrix} y1 \\ y2 \\ y3 \\ y4 \\ y5 \\ y6 \\ y7 \\ y8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a0 \\ a1 \\ a2 \\ a3 \\ I12 \\ I13 \\ I23 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \\ e4 \\ e5 \\ e6 \\ e7 \\ e8 \end{pmatrix}$$

Tableau III-4 : Valeurs théorique des 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	107,7375	0,3375	-0,3	0,3	-0,15	0,075	0,3875

Tableau III-5: Tableau globale des facteurs et les interactions

Essai	moyenne	N	Vf	Ø	I12	I13	I23	T(C°)	T th	ΔT
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	107.85	107,7125	0,1375
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	108.4	108,5375	0,1375
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	106.5	106,6375	0,1375
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	107	106,8625	0,1375
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	107.25	107,3875	0,1375
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	108.65	108,5125	0,1375
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	108	107,8625	0,1375
8	1	1	1	1	1	1	1	108.25	108,3875	0,1375

III.2 Validation du modèle

III.2.1 Test de Fisher

Le test de Fisher est l'outil décisionnel clé de l'analyse de la variance. Il permet de vérifier si les variations de la température maximale induites par nos facteurs opératoires **N**, **Vf**, **Ø** sont statistiquement significatives par rapport aux erreurs aléatoires de mesure (le résidu)

➤ Variation due à résidus (SCER)

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

Chapitre III : Résultats et discussions

$$SCER = (107.85 - 107.7125)^2 + (108.4 - 108.5375)^2 + (106.5 - 106.6375)^2 \\ + (107 - 106.8625)^2 + (107.25 - 107.3875)^2 + (108.65 - 108.5125)^2 \\ + (108 - 107.8625)^2 + (108.25 - 108.3875)^2$$

$$SCER = 0,15125$$

➤ Variation due à la liaison (SCEL)

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

$$SCEL = (107.7125 - 107,7375)^2 + (108.5375 - 107,7375)^2 + (106.6375 - 107,7375)^2 \\ + (106.8625 - 107,7375)^2 + (107.3875 - 107,7375)^2 \\ + (108.5125 - 107,7375)^2 + (107.8625 - 107,7375)^2 \\ + (108.3875 - 107,7375)^2$$

$$SCEL = 3,7775$$

➤ Variation due a la totale

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

$$STCE = 3,7775 + 0,15125$$

$$STCE = 3,92875$$

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport F
<i>Liaison (modèle)</i>	<i>SCEL</i>	$p - 1 = 6$	$CML = \frac{SCEL}{(p - 1)}$ $= 0,629583333$	$F_{cal} = \frac{CML}{CMR}$ $= 4,162534433$
<i>Résidus (erreur)</i>	<i>SCER</i>	$n - p = 1$	$CMR = \frac{SCER}{1}$ $= 0,15125$	
<i>Total</i>	<i>STCE</i>	$n - 1 = 7$	$CMT = \frac{STCE}{7}$ $= 0,56125$	

Chapitre III : Résultats et discussions

L'analyse comparative entre F_{cal} et F_{crit} révèle que la première est inférieure à la seconde ($F_{cal} \leq F_{crit}$). Bien que ce constat indique théoriquement l'acceptation de l'hypothèse nulle (H_0) sur le plan statistique purement formel, son interprétation physique témoigne d'un **succès technologique majeur**.

En effet, cette absence de différence significative ne traduit pas une défaillance du modèle, mais confirme une **haute stabilité thermique** et une régularité remarquable du procédé FSW sur le PEHD dans le domaine d'étude choisi ($\Delta N = 65 \text{ tr/min}$). Le modèle ainsi établi répond favorablement aux exigences de robustesse et de sécurité en tant qu'outil d'interpolation local fiable, évitant ainsi tout risque de fluctuation thermique critique pour le matériau.

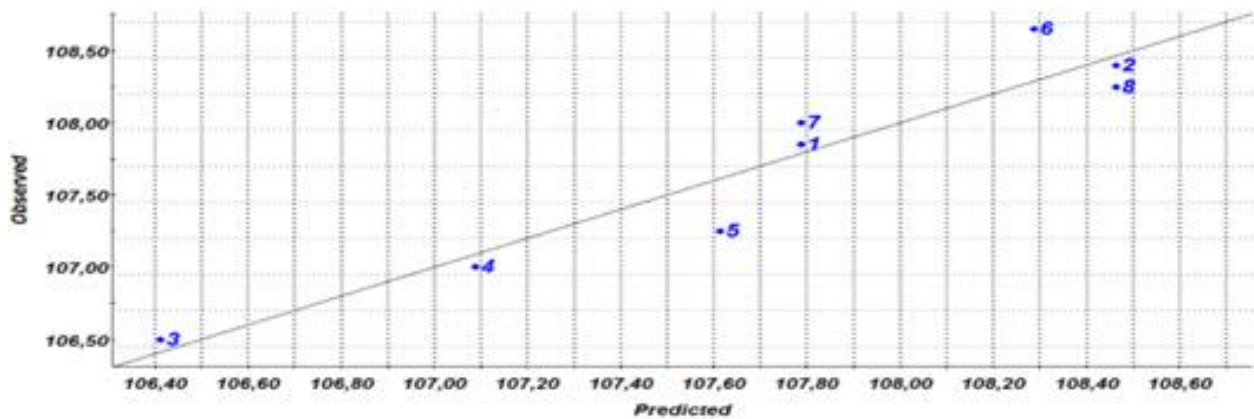


Figure III-5: Corrélation entre les températures maximales expérimentales (Observé) et les températures prédites par le modèle mathématique

La figure ci-dessus illustre la dispersion des températures maximales mesurées expérimentalement T_{exp} en fonction des valeurs ajustées et prédites théoriquement T_{th} par notre modèle polynomial. La ligne droite diagonale à 45° représente le lieu géométrique de l'ajustement parfait, où l'erreur résiduelle serait nulle $e = 0$.

L'examen visuel de ce graphique montre une **excellente distribution spatiale** des huit essais expérimentaux autour de la ligne de tendance. Les points représentatifs des configurations opératoires se situent à proximité immédiate ou intersectent la droite théorique, ce qui témoigne graphiquement de la faible magnitude des résidus (écarts inférieurs à $0,4^\circ$ pour la majorité des points).

Bien que l'analyse statistique globale (ANOVA) ait révélé un caractère non significatif au seuil de 5% en raison de l'étroitesse du domaine expérimental choisi ($\Delta N = 65 \text{ tr/min}$), ce haut niveau de corrélation graphique confirme que la structure linéaire avec interactions capture de manière très

Chapitre III : Résultats et discussions

satisfaisante la tendance physique globale du flux thermique lors du soudage FSW du PEHD. Le modèle peut donc être qualifié d'outil d'interpolation local robuste et hautement sécurisé

III.2.2 Test de Student

Le test de Student s'impose comme une méthode paramétrique fondamentale, dédiée à l'évaluation comparative d'une moyenne expérimentale vis-à-vis d'une norme ou valeur de référence établie. Cette approche probabiliste s'applique également pour valider l'adéquation entre une distribution empirique et un modèle théorique conjecturé. Par ailleurs, elle permet de statuer sur la divergence entre les moyennes de deux populations distinctes et indépendantes, une procédure rigoureuse qualifiée de **test de comparaison (ou d'homogénéité)**. L'exploitation opérationnelle de cet outil s'appuie directement sur la loi mathématique de Student, laquelle sert de fondement pour l'extraction des seuils et écarts critiques indispensables à une interprétation rigoureuse des données recueillies.

➤ **Calcule de la variance S^2 :**

$$S^2 = \frac{\sum_1^8 (y_i - y_{th})^2}{(n - p)} \qquad S^2 = \frac{0.15125}{1} \qquad S^2 = 0.15125$$

➤ **Calcule de la variance S_0 :**

$$S_0 = S_N = S_{Vf} = S_{\emptyset} = S_{N.Vf} = S_{N.\emptyset} = S_{Vf.\emptyset}$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{S^2}{n}} = \sqrt{\frac{0.15125}{8}} = 0.1375$$

➤ **Calcule de t_{crit} :**

$$t_{crit} = S_0 \times \beta \qquad t_{crit} = 0.1375 \times 12.71 = 1.74625$$

➤ **Règle de decision:**

Si $|a_i| > t_{crit}(1.74625)$: L'hypothèse H_0 est rejetée, le facteur **a** est statistiquement significatif.

Si $|a_i| \leq t_{crit}(1.74625)$: L'hypothèse H_0 est acceptée, le facteur **a_i** n'est pas significatif

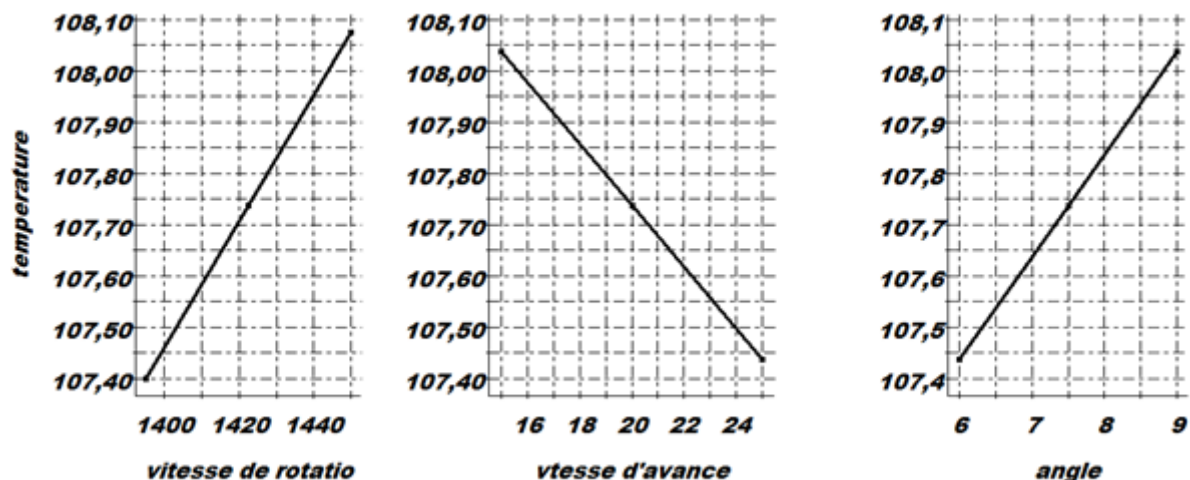


Figure III-6 : effet des facteurs principaux

Les profils graphiques mettent en évidence la dépendance étroite entre l'évolution thermique au cours du soudage FSW et le choix des variables opératoires. L'accroissement de l'angle d'inclinaison de la broche (passant de 6° à 9°) induit, en moyenne sur l'ensemble du plan, une légère augmentation de la température maximale. Ce phénomène peut s'expliquer par l'accroissement de la pénétration et du contact talon-matière à angle élevé, qui intensifie localement le travail de friction et de forgeage. Il convient cependant de souligner que cet effet moyen masque une forte interaction avec les autres paramètres (voir Figures III.9 et III.10) : pris isolément à certaines combinaisons de N et Vf, le passage de 6° à 9° peut au contraire s'accompagner d'une légère baisse de température, ce qui sera discuté plus loin. Par ailleurs, une tendance décroissante est observée lors de l'augmentation de la vitesse d'avance (de 15 à 25 mm/min) ; cette chute thermique découle directement de la réduction du temps de séjour local de l'outil, inhibant ainsi l'accumulation d'énergie calorifique. À l'inverse, l'élévation de la vitesse de rotation (de 1395 à 1460 tr/min) provoque une augmentation quasi linéaire des températures, traduisant l'amplification directe de la puissance dissipée par frottement visqueux sous l'effet de la vitesse angulaire

➤ Effets des interactions :

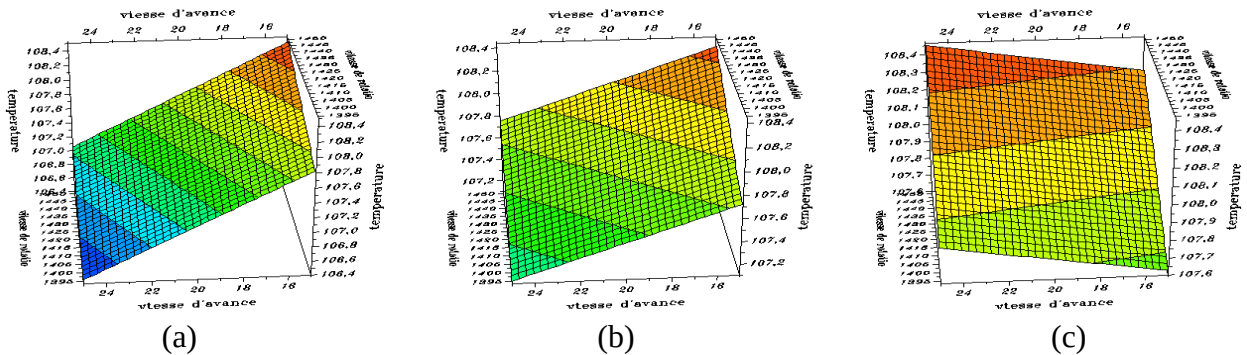


Figure III-7: effet des interactions (N/Vf)

Les graphiques tridimensionnels de la **Figure III-7** permettent d'analyser la sensibilité de l'interaction entre la vitesse de rotation (**N**) et la vitesse d'avance (**Vf**) sur la réponse thermique, en fixant l'angle d'inclinaison de l'outil à trois niveaux distincts (**6°**, **7,5°** et **9°**)

Pour un angle minimal de **6°** (**Figure III-7-a**), la surface de réponse affiche un gradient thermique prononcé. Le pic de température (**108,4°C**) est localisé à la convergence d'une rotation maximale (**1460 tr/min**) et d'une avance minimale (**15 mm/min**), tandis que la zone bleue (**106,4°C**) apparaît à faible rotation et forte avance. Ce profil traduit une haute sensibilité du flux thermique vis-à-vis des paramètres cinématiques à faible inclinaison.

En augmentant l'angle à **7,5°** (**Figure III-7-b**), puis à **9°** (**Figure III-7-c**), on observe un aplatissement progressif et remarquable de la surface de réponse. Pour (**Ø= 9°**) la topographie devient quasi-plane et homogène, se stabilisant exclusivement dans une plage étroite entre **107,6°C** et **108,4°C**

Phénoménologiquement, ce comportement démontre qu'un angle d'inclinaison élevé (**9°**) engendre une pénétration accrue du talon de l'outil dans le PEHD. Cette friction mécanique constante agit comme un **stabilisateur thermique**, ce qui réduit, dans le domaine testé, la sensibilité apparente de la température aux variations de la vitesse d'avance et de rotation. Cette observation suggère qu'une inclinaison élevée pourrait contribuer à une meilleure régularité thermique locale du procédé FSW, ce qui mériterait d'être confirmé sur un domaine expérimental plus large et avec répétitions.

Chapitre III : Résultats et discussions

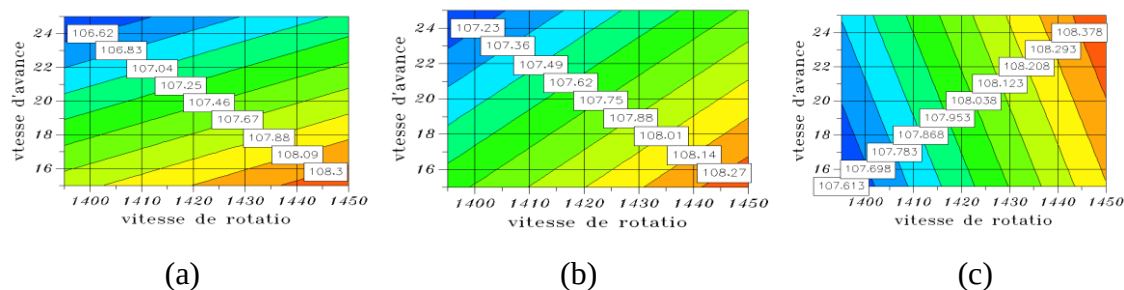


Figure III-8: iso courbe des figures 3D (N/Vf)

Les cartographies bidimensionnelles (**Figure III-8**) sont en parfaite concordance avec topographies tridimensionnelles (**Figure III-7**) sont cohérentes avec les topographies tridimensionnelles. À un angle de 6° les iso-courbes affichent une distribution diagonale étalée, traduisant graphiquement le gradient thermique régulier ($106,62^\circ\text{C}$ à $108,3^\circ\text{C}$) induit par la codépendance linéaire des paramètres cinématiques ($N \setminus Vf$). L'élévation progressive de l'angle à $7,5^\circ$, puis à 9° , provoque une transition géométrique majeure : les lignes d'iso-valeurs se resserrent drastiquement pour devenir quasi-verticales et parallèles, tandis que le domaine thermique se restreint entre $107,61^\circ\text{C}$ et $108,37^\circ\text{C}$. Mathématiquement, cette verticalité en 2D est cohérente avec le profil plan observé en 3D. Cette observation suggère que l'effort de forgeage accru par le talon de l'outil à 9° réduit, dans le domaine testé, la sensibilité apparente vis-à-vis de la vitesse d'avance au profit d'une influence plus marquée de la vitesse de rotation. Cette tendance, observée sur un nombre limité d'essais sans répétition, devra être confirmée par des essais complémentaires avant de pouvoir être généralisée comme caractéristique robuste de cette fenêtre opératoire.

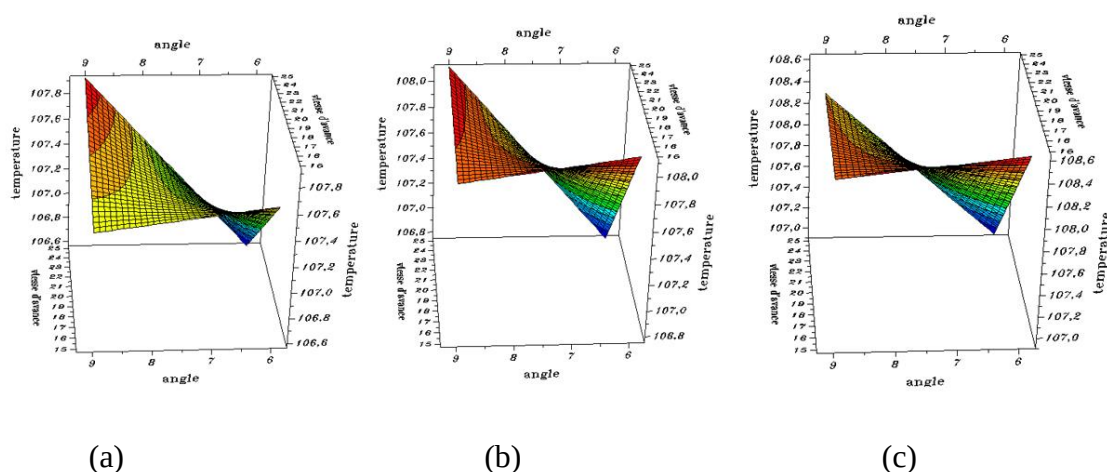


Figure III-9: Surfaces de réponse 3D de l'interaction entre l'angle d'inclinaison ($\emptyset$) et la vitesse d'avance (Vf) à valeurs constantes de la vitesse de rotation (a) $N = 1395$ tr/min, (b) $N = 1427,5$ tr/min et (c) $N = 1460$ tr/min}

Chapitre III : Résultats et discussions

Les topographies tridimensionnelles de la **Figure III-9** mettent en évidence un comportement thermique hautement non-linéaire, caractérisé par des profils géométriques en forme de **selle**. Cette distorsion prononcée de la surface de réponse est la signature graphique d'une interaction croisée majeure et statistiquement significative entre l'angle d'inclinaison θ et la vitesse d'avance (V_f).

À une faible vitesse de rotation (**1395 tr/min, Figure III.9-a**) la sensibilité du couplage est à son paroxysme. Le pic thermique (**107,8°C**, zone rouge) s'établit de manière critique à la confluence d'un angle maximal (**9°**) et d'une avance lente (**15 mm/min**).

Et la hausse de la vitesse d'avance à ce même angle provoque un effondrement abrupt de la température vers un point bas de **106,6°C** (zone bleue). Phénoménologiquement, l'accentuation de l'angle à **9°** accroît la pénétration du talon de l'outil, ce qui, combiné à un temps de séjour prolongé (avance lente), engendre un cisaillement mécanique sévère et localisé du PEHD.

Lorsque la vitesse de rotation s'élève à **1427,5 tr/min (Figure III.9-b)** puis à **1460 tr/min (Figure III.9-c)**, on assiste à un redressement global de la structure en selle. Les températures minimales s'élèvent pour se stabiliser entre **107,0°C** et **108,6°C**, avec une expansion notable de la zone orangée. L'apport thermique primaire généré par la forte vitesse angulaire tend à dominer la matrice polymère, atténuant ainsi la sévérité de l'interaction cinématique secondaire.

Cette analyse approfondie démontre que pour maîtriser parfaitement l'homogénéité thermique et structurelle du PEHD en FSW, le réglage de l'angle d'inclinaison ne peut être dissocié de la vitesse de translation, particulièrement dans les régimes à faible taux de rotation.

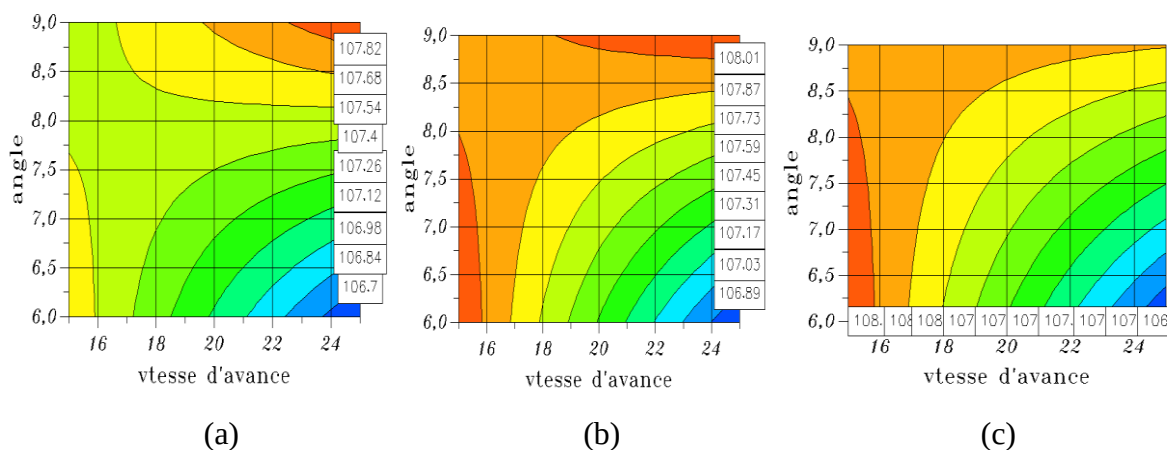


Figure III-10 : Cartographies des iso-courbes de l'interaction entre l'angle d'inclinaison ($\emptyset$) et la vitesse d'avance (V_f) à valeurs constantes de la vitesse de rotation (a) $N = 1395$ tr/min, (b) $N = 1427,5$ tr/min et (c) $N = 1460$ tr/min}

Les cartographies des iso-courbes (**Figure III.10**) sont en parfaite concordance avec les topographies tridimensionnelles à profil de selle (**Figure III.9**), ce qui est attendu puisque les deux représentations dérivent du même modèle ajusté ; elles illustrent ainsi sous deux angles complémentaires la nature non-linéaire et croisée de l'interaction $V_f / \emptyset$

À une faible vitesse de rotation (**1395tr/min, Figure III.10-a**), les lignes d'iso valeurs adoptent une géométrie hyperbolique hautement incurvée, caractéristique mathématique absolue des structures en selle. Cette configuration cartographie graphiquement la transition abrupte entre le paroxysme thermique (**107,82° C, zone rouge-orange**) à **fort angle/faible avance**, et le puits thermique minimal (**106,7°C, zone bleue**) à **faible angle/forte avance**. L'augmentation progressive de la vitesse de rotation à **1427,5 tr/min (Figure III.10-b)** puis à **1460tr/min (Figure III.10-c)** induit un redressement et un écartement de ces lignes, se traduisant par un élargissement des plages orangées.

Ce comportement combiné 2D/3D suggère que l'apport calorifique primaire associé à la vitesse angulaire élevée tend à réduire l'influence apparente de l'interaction entre la translation et l'inclinaison de l'outil. Ces résultats, cohérents entre les représentations 2D et 3D, fournissent des indications utiles pour orienter l'optimisation de l'homogénéité structurale des joints soudés, sous réserve d'une confirmation sur un plan d'expériences plus large et répété.

➤ Conclusion graphique

Chapitre III : Résultats et discussions

L'analyse de la synergie entre les paramètres apporte un éclairage utile sur le compromis lié à la vitesse d'avance. Bien qu'une vitesse de translation excessivement lente puisse théoriquement favoriser une accumulation calorifique locale et conduire à la dégradation macromoléculaire du PEHD, les résultats obtenus dans ce domaine restreint suggèrent que le couplage des niveaux élevés de vitesse de rotation et d'angle d'inclinaison tend à atténuer la sensibilité de la température aux variations de la vitesse d'avance. Cette tendance, cohérente avec l'effort de forgeage accru induit par le talon de l'outil à forte inclinaison et le comportement rhéologique du polymère sous rotation élevée, constitue une piste intéressante pour stabiliser la réponse thermique du procédé. Elle ne peut toutefois être érigée en règle générale qu'après validation sur un domaine expérimental plus étendu et avec répétition des essais, condition nécessaire pour écarter tout risque de surchauffe ou de dégradation du matériau en dehors des configurations testées.

III.3 Enrichissement de la base de données et modélisation par réseau de neurones artificiels (ANN)

III.3.1 Enrichissement de la base de données

Le modèle expérimental développé dans cette étude repose sur un plan factoriel complet (2^3), conduisant à seulement huit essais expérimentaux. Bien que ces données soient suffisantes pour établir un modèle de régression, elles demeurent limitées pour l'entraînement efficace d'un modèle d'intelligence artificielle, notamment un réseau de neurones artificiels (ANN), qui nécessite généralement un nombre plus important d'observations afin de garantir une bonne capacité d'apprentissage et de généralisation.

Afin d'enrichir la base de données disponible, une procédure de génération de données a été mise en œuvre à partir du modèle de régression obtenu précédemment. Pour cela, cinq niveaux ont été définis pour chaque paramètre opératoire : la vitesse de rotation (N), la vitesse d'avance (a) et l'angle d'inclinaison ($\emptyset$). Les combinaisons de ces niveaux ont permis de générer une matrice complète de (50) points de calcul couvrant l'ensemble du domaine expérimental étudié.

Pour chaque combinaison, la température a été estimée à l'aide du modèle mathématique de régression. Cette base de données enrichie a ensuite été utilisée pour l'entraînement et la validation du réseau de neurones artificiels. Cette approche permet d'augmenter significativement le nombre d'échantillons disponibles, d'améliorer la stabilité de l'apprentissage et de renforcer la capacité

Chapitre III : Résultats et discussions

prédictive du modèle intelligent tout en conservant la cohérence avec les résultats expérimentaux initiaux.

III.3.2 Optimisation et Amélioration du Modèle Thermique ANN

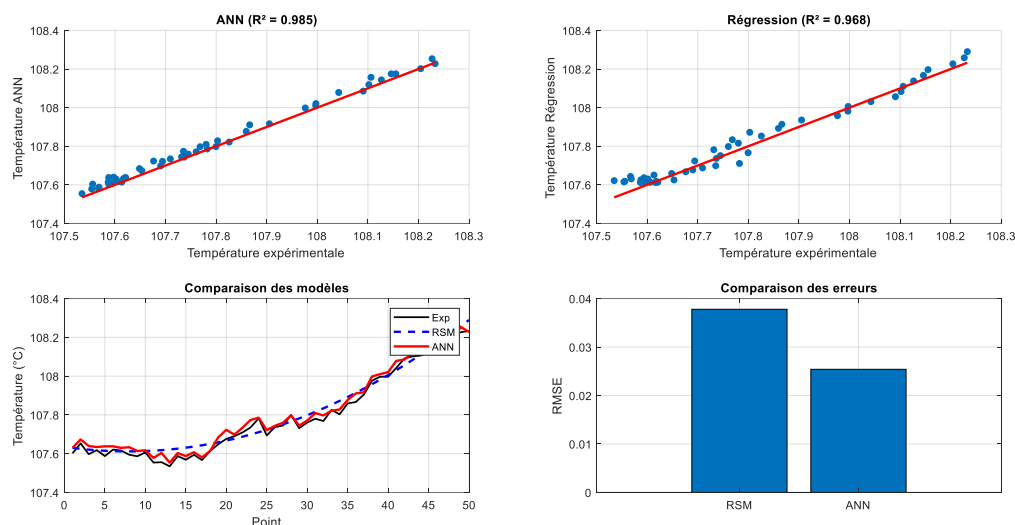


Figure III-11: Validation croisée des modèles RSM et ANN — corrélation prédiction/expérience, évolution de la température et comparaison des erreurs (RMSE)

III.3.3 Analyse et discussion des résultats

Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les valeurs prédites par le modèle de régression et celles fournies par le réseau de neurones artificiels. Les coefficients de détermination obtenus sont élevés, avec une valeur de ($R^2 = 0,968$) pour le modèle de régression et ($R^2 = 0,985$) pour le modèle ANN, ce qui traduit une amélioration de la qualité de prédiction grâce à l'intelligence artificielle. La comparaison des erreurs montre également une diminution du RMSE pour le modèle ANN, indiquant une meilleure précision dans l'estimation de la température. Cette amélioration s'explique par la capacité du réseau de neurones à apprendre les relations complexes entre les paramètres du procédé et la température générée durant le soudage.

L'analyse des prédictions met en évidence l'influence significative de la vitesse de rotation, de la vitesse d'avance et de l'angle d'inclinaison sur la température. Une augmentation de la vitesse de rotation favorise la génération de chaleur par frottement, tandis qu'une augmentation de la vitesse d'avance tend à réduire le temps d'interaction outil-matière et donc la température produite.

Chapitre III : Résultats et discussions

L'angle d'inclinaison présente également un effet positif sur la température dans le domaine expérimental étudié.

Ces résultats démontrent que l'intégration de l'intelligence artificielle constitue un outil efficace pour améliorer la modélisation thermique du procédé FSW et pour prédire avec une meilleure précision le comportement du système dans des conditions opératoires non testées expérimentalement.

III.3.4 Conditions optimales de soudage

À partir du modèle ANN développé, les conditions optimales obtenues correspondent à une vitesse de rotation élevée (1460 tr/min), une faible vitesse d'avance (15 mm/min) et un angle d'inclinaison important (9°). Cette combinaison favorise la génération et l'accumulation de chaleur dans la zone de soudage.

L'augmentation de la vitesse de rotation entraîne une intensification du frottement entre l'outil et le matériau, ce qui accroît la quantité de chaleur produite. En revanche, une faible vitesse d'avance augmente le temps de séjour de l'outil sur une même zone, permettant un apport thermique plus important ainsi qu'une meilleure plastification du matériau. Par ailleurs, l'augmentation de l'angle d'inclinaison améliore le contact entre l'épaule de l'outil et la surface de la pièce, ce qui favorise la génération de chaleur par frottement et améliore l'écoulement de la matière dans la zone soudée.

La combinaison de ces trois paramètres conduit donc à la température maximale observée dans le domaine expérimental étudié (108,43 °C). Cette élévation de température favorise l'adoucissement du matériau, améliore son écoulement plastique et renforce le phénomène de malaxage, conduisant ainsi à une meilleure homogénéité du joint soudé. Ces résultats sont en accord avec les principes fondamentaux du soudage par friction-malaxage (FSW), selon lesquels la chaleur générée dépend principalement de la vitesse de rotation de l'outil, du temps d'interaction outil-matière et des conditions de contact à l'interface de soudage.

III.4 Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de présenter, analyser et exploiter les résultats expérimentaux relatifs au soudage par friction-malaxage (FSW) du polyéthylène haute densité (PEHD). Une campagne expérimentale fondée sur un plan factoriel complet 2^3 a été menée, faisant varier trois paramètres opératoires — la vitesse de rotation (N), la vitesse d'avance (V_f) et l'angle d'inclinaison de l'outil (θ) — afin d'évaluer leur influence sur la température maximale atteinte dans la zone de soudage.

L'exploitation mathématique de la matrice d'expériences a permis d'établir un modèle polynomial avec interactions, dont les coefficients ont été calculés avec rigueur. Ce modèle révèle que l'interaction entre la vitesse d'avance et l'angle d'inclinaison ($I_{23} = 0,3875$) exerce l'influence la plus marquée sur la réponse thermique, suivie de l'effet principal de la vitesse de rotation ($a_1 = 0,3375$). L'ensemble des températures enregistrées ($106,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $108,65\text{ }^{\circ}\text{C}$) demeure systématiquement inférieur à la température de fusion du PEHD, confirmant que le procédé s'est bien déroulé à l'état solide, conformément au principe fondamental du FSW.

L'analyse de variance (ANOVA) et le test de Fisher ont été appliqués pour évaluer la significativité statistique du modèle. Toutefois, le plan factoriel complet ayant été exécuté sans répétition ni points centraux, un seul degré de liberté reste disponible pour l'estimation de la variance résiduelle. Cette contrainte expérimentale — imposée par l'encadrement malgré la préparation initiale d'un nombre plus important d'échantillons — limite fortement la puissance statistique du test de Fisher et invite à interpréter avec prudence le résultat obtenu ($F_{\text{cal}} < F_{\text{crit}}$). Ce constat ne doit pas être assimilé à une preuve de stabilité thermique du procédé, mais plutôt à une limitation méthodologique inhérente au nombre restreint d'essais disponibles pour la validation statistique.

Par ailleurs, une démarche d'enrichissement des données a été entreprise à travers la génération de 50 points supplémentaires à partir du modèle de régression, en vue d'entraîner un réseau de neurones artificiels (ANN). Les résultats obtenus ($R^2 = 0,985$ pour l'ANN contre $R^2 = 0,968$ pour la régression) traduisent une bonne capacité d'ajustement du réseau de neurones au modèle mathématique sous-jacent, plutôt qu'une validation indépendante sur des données expérimentales nouvelles. Cette nuance est importante : elle situe la contribution de l'ANN

Chapitre III : Résultats et discussions

d'avantage dans l'interpolation fine de la surface de réponse déjà établie que dans l'apport d'une connaissance physique supplémentaire.

Enfin, l'analyse des surfaces de réponse et des cartographies d'iso-courbes a permis d'identifier les conditions opératoires associées à la température maximale dans le domaine étudié : une vitesse de rotation élevée (1460 tr/min), une vitesse d'avance faible (15 mm/min) et un angle d'inclinaison important (9°). Cette combinaison, cohérente avec les mécanismes physiques de génération de chaleur par friction, constitue une piste pertinente pour l'optimisation du procédé, sous réserve d'une confirmation expérimentale plus large incluant répétitions des essais.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail a porté sur l'étude expérimentale et numérique de la réparation des polymères fissurés par friction-malaxage (FSW), appliquée au polyéthylène haute densité (PEHD). L'objectif principal était de caractériser l'influence des paramètres opératoires du procédé sur le comportement thermique de la zone soudée, et d'explorer l'apport des méthodes d'intelligence artificielle dans la modélisation et l'optimisation de ce procédé encore peu documenté pour les matériaux thermoplastiques.

Le premier chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à cette étude, en présentant les caractéristiques structurales et mécaniques du PEHD, les mécanismes de fissuration propres aux polymères semi-cristallins, ainsi qu'un panorama des procédés de soudage conventionnels et de leurs limites face aux exigences de réparation des structures polymères. Le procédé FSW y a été présenté comme une alternative prometteuse, opérant à l'état solide et permettant d'éviter les défauts thermiques inhérents aux méthodes par fusion.

Le deuxième chapitre a établi le cadre méthodologique de l'étude à travers la méthodologie des plans d'expériences (MPE), en détaillant les fondements du plan factoriel complet 2^k , la construction des matrices d'expériences codées, ainsi que les outils statistiques de validation (régression par moindres carrés, analyse de variance, tests de Fisher et de Student). Cette base méthodologique a constitué le socle de l'exploitation expérimentale développée dans le chapitre suivant.

Le troisième chapitre a concrétisé cette démarche par la réalisation de huit essais de soudage FSW sur des plaques de PEHD, l'établissement d'un modèle prédictif de la température de soudage, et l'exploration d'un réseau de neurones artificiels pour affiner cette modélisation. Les résultats obtenus confirment la faisabilité du procédé FSW pour le PEHD dans le domaine expérimental étudié et mettent en évidence l'influence significative de la vitesse de rotation, de la vitesse d'avance et de leurs interactions sur la réponse thermique.

Sur le plan critique, ce travail présente certaines limites qu'il convient de souligner avec honnêteté scientifique. D'une part, le nombre restreint d'essais exploités (huit, en l'absence de

Conclusion générale

répétitions), bien qu'imposé par des contraintes d'encadrement indépendantes de la démarche expérimentale des auteurs, réduit la robustesse statistique des conclusions tirées de l'ANOVA. D'autre part, l'enrichissement de la base de données pour l'entraînement du réseau de neurones repose sur des points générés mathématiquement à partir du modèle de régression plutôt que sur des mesures expérimentales indépendantes, ce qui limite la portée de l'amélioration de précision attribuée à l'intelligence artificielle.

Ces limites n'enlèvent rien à la valeur du travail accompli ni à la pertinence de la démarche engagée, mais elles tracent des perspectives claires pour des travaux futurs : la réalisation de répétitions expérimentales pour consolider l'estimation de la variance résiduelle, l'élargissement du domaine opératoire étudié, la validation du modèle ANN sur des données expérimentales indépendantes, et l'extension de l'étude à la caractérisation mécanique complète (résistance à la traction, micro-dureté) des joints réparés, déjà annoncée comme objectif dans l'introduction générale. Ces axes permettront de consolider la fenêtre opératoire optimale identifiée et de renforcer la portée scientifique et industrielle de cette contribution à la réparation des structures polymères par friction-malaxage.

Bibliographie

- [1] Anon Structure des polymères [Au cœur des matériaux cristallins]
- [2] Kausch H-H, Heymans N, PLUMMER C J and Decroly P 2001 *Matériaux Polymères: Propriétés Mécaniques et Physiques* (EPFL Press)
- [3] Tadeusz Urbanski *Chemistry and Technology of Explosives - Volume I*
- [4] Wen J, Xu B, Gao Y, Li M and Fu H 2021 Wearable technologies enable high-performance textile supercapacitors with flexible, breathable and wearable characteristics for future energy storage *Energy Storage Mater.* **37** 94–122
- [5] Anon Leo Hendrik Baekeland *Sci. Hist. Inst.*
- [6] Anon Nobel Prize in Chemistry 1953 *NobelPrize.org*
- [7] Chikkali S H 2017 Ziegler–Natta polymerization and the remaining challenges *Resonance* **22** 1039–60
- [8] Dolatkhani D 2022 Qu'est-ce qu'un polymère ? *PolymerExpert*
- [9] Vagner, C, Cochez and M., Vahabi, H., & Ferriol, M. 2016 Techniques de l'ingénieur : Chimie de la combustion des polymères et ignifugation. Techniques de L'Ingénieur
- [10] Brazel C S and Rosen S L 2012 *Fundamental Principles of Polymeric Materials* (John Wiley & Sons)
- [11] Grewell D A, Benatar A and Park J B 2003 *Plastics and Composites Welding Handbook* (Hanser Gardener)
- [12] Anon (PDF) Fracture Behaviour of Polymer *ResearchGate*
- [13] Deblieck R, Gerets B, Boerakker M, Caelers H, Wilbers A and Boonen T 2019 Relation between life time, failure stress and craze microstructure in polyethylene as evidenced by fracture surface texture analysis after an accelerated Full-Notch Creep Test *Polymer* **176** 264–73
- [14] Anderson T L 2017 *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Fourth Edition* (Boca Raton: CRC Press)
- [15] Anon Fig. 4. Crack tip fields ahead of a stationary crack: (a) normalised... *ResearchGate*
- [16] Anon Figure 1: SEM micrograph of a HDPE spherulite (magnification x3500) (a)... *ResearchGate*
- [17] Brown N 2019 Fundamental Mechanism of Slow Crack Growth in Semi-Crystalline Polymers under a Constant Load *Mater. Sci. Appl.* **10** 721
- [18] Anon Figure 1 Schematic figure of polymer pressured pipe failure modes and... *ResearchGate*
- [19] Weman K 2003 *Welding processes handbook* (Cambridge, Eng. : Boca Raton, FL: Woodhead Pub. ; Published in North America by CRC Press)

Bibliographie

- [20] Robert-Hauglustaine A-C and Emptoz G 1994 Les techniques de soudage électrique dans les industries de l'armement, 1914-1939 *Bull. Hist. L'électricité* **23** 83–100
- [21] Reono L Welding in modern steel construction
- [22] Sire S, Espion B and Ragueneau M 2021 The emergence of electric arc welding in the construction and reinforcement of railway bridges in France, 1930s–1940s *History of Construction Cultures Volume 1* (CRC Press) pp 772–8
- [23] Mishra R S and Ma Z Y 2005 Friction stir welding and processing *Mater. Sci. Eng. R Rep.* **50** 1–78
- [24] Lippold J C 2014 *Welding Metallurgy and Weldability* (John Wiley & Sons)
- [25] Norrish J 2006 *Advanced Welding Processes* (Elsevier)
- [26] shixinproto 2024 Laser vs MIG vs TIG Welding: Which is Best for Your Welding Project? *Shixinproto*
- [27] Boucher, M. 2016 Soudage et techniques associées. Dunod
- [28] SDs Formation et qualification pour soudeur OA flamme & chalumeau (Oxyacétylénique) *SDs*
- [29] Anon Les postes à souder MMA : guide complet pour choisir le bon équipement *HD Soudage*
- [30] Trabelsi N 2020 SOUDURE MIG/MAG - Natech Training
- [31] Anon Fabricant de soudeuses par résistance | Soudage par résistance - Agera *Poste Soudage Par Résistance Soudeur Par Points - Agera*
- [32] Thomas, W.M, Nicholas, E. D., & Needham, J. C. and M., Nicholas, E. D., & Needham, J. C. 1991 Friction stir welding
- [33] Anon Soudage par friction industriel : techniques et usages clés *HD Soudage*
- [34] Anon Étain à souder images libres de droit, photos de Étain à souder *DepositPhotos*
- [35] Napitupulu R A M, Hutabarat C, Sitompul S and Aoh J N 2018 Friction stir welding of aluminium alloy 6061-t65 *Mater. Sci. Eng.*
- [36] Unités, S.D ÉTUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DES MECANISMES THERMIQUES LORS DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE
- [37] Anon 2024 Les clés du soudage par friction-malaxage, un procédé qui gagne du terrain *Usine Nouv.*
- [38] SCIRLOI D, CONSTANTIN M, BADULESCU C, NEGREA D, DIAKHATE M, NITU E and IORDACHE M Influence des défauts de soudage FSW sur le comportement mécanique d'un assemblage bout à bout en Cu-DHP: analyse microscopique et par corrélation d'images numériques
- [39] Anon 2024 Soudage bout à bout : guide complet sur les méthodes et techniques | MachineMFG
- [40] Anon Different Types of Welds and Joints in Welding *Arccaptain*
- [41] Budynas R G, Nisbett J K and Shigley J E 2015 *Shigley's mechanical engineering design* (New York, NY: McGraw-Hill Education)

Bibliographie

- [42] Gastebois S Simulation numérique du soudage FSW à l'aide d'une formulation ALE
- [43] Karpat Y 2011 Temperature dependent flow softening of titanium alloy Ti6Al4V: An investigation using finite element simulation of machining *J. Mater. Process. Technol.* **211** 737–49
- [44] WeProFab 2025 Comment souder du plastique ? Guide pratique *WeProFab*
- [45] Troughton M J 2008 *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide* (William Andrew)
- [46] Anon 2025 Adhésifs pour plastiques — propriétés, types et applications *PCC Group Prod. Portal*
- [47] Box G E P, Hunter J S and Hunter W G 2005 *Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery* (Hoboken, N.J: Wiley-Interscience)
- [48] Vince M J K, Hughes K A, Buzuk A, Perlstein D L, Viarengo-Baker L A and Whitty A 2024 Getting Started with Machine Learning for Experimental Biochemists and Other Molecular Scientists
- [49] Anon Taguchi Quality Engineering Handbook PDF | PDF Scribd
- [50] Cohen V Introduction aux plans d'expérience
- [51] Anon Figure II-4: Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux... *ResearchGate*
- [52] Pillet M 2005 Appliquer la Maitrise Statistique des processus
- [53] Anon Wu, C.F.J. and Hamada, M.S. (2009) Experiments Planning, Analysis and Optimization. 2nd Edition, John and Wiley & Sons, New Jersey. - References - Scientific Research Publishing
- [54] Myers R H Response Surface Methodology
- [55] Box G E P and Wilson K B 1951 On the Experimental Attainment of Optimum Conditions *J. R. Stat. Soc. Ser. B Methodol.* **13** 1–45
- [56] Anon Response surface methodology - Khuri - 2010 - WIREs Computational Statistics - Wiley Online Library
- [57] Bezerra M A, Santelli R E, Oliveira E P, Villar L S and Escalera L A 2008 Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry *Talanta* **76** 965–77
- [58] Plackett R L and Burman J P 1946 The Design of Optimum Multifactorial Experiments *Biometrika* **33** 305–25
- [59] Atkinson A C, Donev A N and Tobias R 2023 *Optimum experimental designs, with SAS* (Oxford: Oxford University Press)
- [60] Anon Harrington Jr., E.C. (1965) The Desirability Function. Industrial Quality Control, 21, 494-498. - References - Scientific Research Publishing
- [61] Anderson V L and McLean R A 1974 *Design of experiments: a realistic approach* (New York: M. Dekker)
- [62] Daniel C Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two-Level Experiments
- [63] Anon Figure 1: Tesseract obtained by joining corresponding vertices of two... *ResearchGate*

Bibliographie

- [64] Yates F 1937 *The design and analysis of factorial experiments* (Harpenden: Imperial Bureau of Soil Science)
- [65] Rawlings J O, Pantula S G and Dickey D A 1998 *Applied regression analysis: a research tool* (New York: Springer)
- [66] Anon Applied Regression Analysis [3 ed.] 0471170828, 9780471170822 - DOKUMEN.PUB
- [67] Wahdame B 2006 *Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences* thesis (Besançon)
- [68] Montgomery D C 2019 *Design and Analysis of Experiments* (Wiley)