

République Algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITE DE RELIZANE**

Faculté des Sciences et Technologies

Département de Génie Mécanique



**THESE DE DOCTORAT LMD 3<sup>ème</sup> cycle**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Présentée par

**M<sup>elle</sup> CHIKH Amina**

Titre de thèse

**Etude Thermomécanique du Procède de Soudage Par Friction  
Malaxage (FSW).**

Soutenue le : **29/04/2024**

**Devant le jury composé de :**

Président	Zine Abdellah	MCA	Univ.de Relizane
Directeur de thèse	Serier Mohamed	Pr	Univ. d'Ain Timouchent
Co-Directeur de thèse	Bellifa Hicham	MCA	Univ.de Sidi Bel-Abbés
Examinatrice	Maarouf Hafida	MCA	Univ. d'Ain Timouchent
Examineur	Aboura Ahmed	MCA	Univ.de Relizane
Examineur	Chaouch Djamel	MCA	Univ.de Relizane

Année Universitaire : 2023/2024

## Remerciements

*Par la suite, Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse le professeur **SERIER Mohamed** pour sa patience, sa disponibilité et ses judicieux conseils. Sa rigueur scientifique et ses précieuses recommandations ont été un guide précieux tout au long de ce travail. Je lui suis infiniment reconnaissant pour la confiance qu'il m'a accordée et pour m'avoir fait bénéficier de son expérience.*

*J'adresse aussi mes remerciements les plus sincères à mon co-directeur de thèse monsieur **BELLIFA Hicham** et à monsieur **ZINE Abdellah** pour l'honneur qui il m'a fait de présider ce jury de soutenance.*

*J'adresse également mes remerciements aux membres du jury, madame **MAAROUF Hafida**, **ABOURA Ahmed**, **CHAOUCH Djamel** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux en acceptant d'évaluer cette thèse.*

*Un remerciement spécial à monsieur **HADJ MOSTEFA Adda** pour ses nombreux conseils et son aide.*

*Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants et du personnel du département de génie mécanique de l'université Ahmed Zabana de Relizane pour leur soutien et leur aide précieuse.*

*Je tiens à remercier chaleureusement ma famille et mes amis, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur patience durant toutes ces années.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de cette thèse.*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail*

*À mon cher père '**CHIKH Lakhdar** رحمه الله'*

*À mes très chères mères '**BOUKHRIRIBA Aicha**' et '**OUADAH Bedra**', qui me donnent toujours l'espoir de vivre et qui n'ont jamais cessé de prier pour moi.*

*Puisse DIEU le Tout Puissant vous garder longtemps à coté de nous.*

*À ma meilleur sœur '**SEGHIER Houda**', mon soutien moral et source de joie et de bonheur, pour ses encouragements, l'aide qu'elle m'a toujours accordé et ses supports dans les moments difficiles.*

*À mes frères **Mohamed** et **Fethi** et sœurs **Kheira**, **Khaldia**, **Fatima**, **Zahia**, **Chaima**, **Ibtihel**, **Amel** et **Manel**, pour l'amour qu'ils me réservent. Je leurs souhaite une vie pleine du bonheur et succès.*

*À tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions*

*À tous le personnel de l'université Ahmed Zabana de Relizane en particulier le personnel du département génie mécanique*

**CHIKH Amina**

## *Résumé*

Le FSW, ou Friction Stir Welding en anglais, est un procédé de soudage par friction malaxage à l'état solide. Il s'agit d'une technique de soudage innovante qui ne nécessite pas de fusion complète des matériaux. Ce processus utilise un outil spécial pour assembler deux pièces en les amenant dans un état pâteux grâce à un pion en rotation. Le FSW est principalement utilisé pour assembler des alliages d'aluminium, mais il peut également être appliqué à d'autres matériaux. Cette technique présente des avantages tels que la réduction des défauts de soudure, la conservation des propriétés des matériaux, et la possibilité de souder des matériaux dissemblables.

Le présent travail de thèse consiste à comprendre les aspects thermiques et mécaniques impliqués dans ce procédé novateur de soudage. Lors de l'étude du procédé de soudage par friction malaxage (FSW), l'utilisation de plans d'expériences s'avère essentielle pour évaluer la qualité de soudure.

Cette étude utilise une modélisation du transfert de chaleur (développer et appliquer des modèles de transfert de chaleur) et une simulation numérique pour comprendre le FSW et pour générer trois interfaces majeures produisant un flux de chaleur entre l'outil et le matériau.

Réaliser des expériences pratiques de FSW pour valider les résultats numériques et garantir l'applicabilité de l'étude dans le monde réel.

Neuf expériences ont été réalisées dans lesquelles deux paramètres ont été variés. Afin de mesurer la température pendant le soudage au niveau de la zone de soudage, cette expérience se fait sur deux plaques d'Al-MgSi de 4 mm d'épaisseur. Et étudie comment les variations de la vitesse de soudage et de la vitesse de rotation affectent les aspects thermiques et mécaniques du FSW.

Ces effets ont été modélisés. Les taux d'apport de chaleur calculés au niveau de l'épaule et les surfaces du pion ( $Q_1, Q_2$ , et  $Q_3$ ) ont été estimés numériquement. Les résultats expérimentaux ont été transformés en un modèle mathématique à l'aide de la méthode de surface de réponse afin d'analyser l'influence des paramètres de soudage sur la chaleur émise par chacune des trois surfaces.

L'analyse et l'interprétation des résultats ont montré que parmi les trois zones d'interface, c'est l'épaule qui génère la chaleur la plus significative, principalement en raison de la surface

de friction considérable entre cette partie et les pièces à souder. En d'autres termes, la friction générée à cette interface spécifique entraîne une production de chaleur plus substantielle par rapport aux autres zones examinées. L'interaction entre les principaux facteurs a produit peu de chaleur sur les trois surfaces.

Le test ANOVA a montré que les résultats expérimentaux trouvés des trois modèles sont en bon accord avec les résultats numériques obtenus.

**Mots clés :** Soudage Par Friction Malaxage, Modélisation, Paramètres De Soudage, Pièces/Outils.

## ***Abstract***

FSW, or Friction Stir Welding, is a solid-state friction stir welding process. It is an innovative welding technique that does not require complete fusion of the materials. The process uses a special tool to join two parts, bringing them into a pasty state by means of a rotating pin. FSW is mainly used to join aluminum alloys, but can also be applied to other materials. The technique offers advantages such as reduced weld defects, conservation of material properties, and the ability to weld dissimilar materials.

The aim of this thesis is to understand the thermal and mechanical aspects involved in this innovative welding process. When studying the friction stir welding (FSW) process, the use of experimental designs is essential to assess weld quality.

This study uses heat transfer modeling (developing and applying heat transfer models) and numerical simulation to understand FSW and to generate three major interfaces producing heat flow between tool and material.

Carry out practical FSW experiments to validate the numerical results and guarantee the applicability of the study in the real world.

Nine experiments were carried out in which two parameters were varied. To measure the temperature during welding at the welding zone, this experiment was carried out on 4 mm thick Al-MgSi sheets and to study how variations in welding speed and rotation speed affect the thermal and mechanical aspects of FSW.

These effects have been modeled. Calculated heat input rates at the shoulder and pan surfaces (Q1, Q2, and Q3) were numerically estimated. The experimental results were transformed into a mathematical model using the response surface method to analyze the influence of welding parameters on the heat emitted by each of the three surfaces.

Analysis and interpretation of the results showed that, of the three interface zones, the shoulder generated the most significant heat, mainly due to the considerable frictional surface between this area and the parts to be welded. In other words, the friction generated at this specific interface results in more substantial heat generation compared to the other areas examined. The interaction between the main factors produced little heat on all three surfaces.

The ANOVA test showed that the experimental results found from the three models are in good agreement with the numerical results obtained.

***Keywords:*** Friction Stir Welding, Modeling, Welding Parameters, Parts/Tools.

## ملخص

يُعد FSW عملية لحام الاحتكاك الدوار في الحالة الصلبة. إنها تقنية لحام مبتكرة لا تتطلب انصهارًا كاملاً للمواد. يستخدم العملية أداة خاصة لربط جزئين، مما يجلبهما إلى حالة عجينية عن طريق دبوس دوار. يُستخدم FSW بشكل رئيسي لربط سبائك الألومنيوم، ولكن يمكن أيضًا تطبيقه على مواد أخرى. تقدم هذه التقنية مزايا مثل تقليل عيوب اللحام، والحفاظ على خصائص المواد، والقدرة على لحام مواد غير متجانسة.

هدف هذه الرسالة هو فهم الجوانب الحرارية والميكانيكية المعنية في هذه العملية المبتكرة للحام. عند دراسة عملية لحام الاحتكاك الدوار (FSW)، يكون استخدام تصميمات تجريبية ضروريًا لتقييم جودة اللحام.

تستخدم هذه الدراسة نمذجة نقل الحرارة (تطوير وتطبيق نماذج نقل الحرارة) والمحاكاة العددية لفهم FSW وتوليد ثلاث واجهات رئيسية تنتج تدفق حراري بين الأداة والمادة.

يتم تنفيذ تجارب FSW العملية لتحقيق التحقق من النتائج العددية وضمان قابلية تطبيق الدراسة في العالم الحقيقي.

تم إجراء تسع تجارب حيث تم تغيير معاملين. لقياس درجة الحرارة أثناء اللحام في منطقة اللحام، تم إجراء هذه التجربة على ورق Al-MgSi بسماكة 4 ملم. ولدراسة كيفية تأثير تغييرات في سرعة اللحام وسرعة الدوران على الجوانب الحرارية والميكانيكية لـ FSW.

تم تقدير معدلات إدخال الحرارة عددًا على الأسطح العلوية والسفلية (Q1 و Q2 و Q3) ثم تم تحويل النتائج التجريبية إلى نموذج رياضي باستخدام أسلوب سطح الاستجابة لتحليل تأثير معاملات اللحام على الحرارة المنبعثة من كل من الثلاثة أسطح.

أظهرت تحليل وتفسير النتائج أنه، من بين ثلاث مناطق الواجهة، كان الكنتف هو الذي أنتج الحرارة الأكثر بروزًا، ناتجًا أساسًا عن السطح الاحتكاكي الكبير بين هذه المنطقة والأجزاء التي يتعين لحامها. بعبارة أخرى، ينتج الاحتكاك الذي يحدث في هذه الواجهة المحددة في النهاية في توليد حرارة أكثر بشكل كبير مقارنة بالمناطق الأخرى التي تم فحصها. التفاعل بين العوامل الرئيسية أنتج قليلًا من الحرارة على كل من الأسطح الثلاثة.

اختبار ANOVA أظهر أن النتائج التجريبية المستمدة من النماذج الثلاثة تتفق بشكل جيد مع النتائج العددية المحصل عليها.

**كلمات مفتاحية:** لحام الاحتكاك الدوار، نمذجة، معاملات اللحام، الأجزاء/الأدوات.

## LISTE DES FIGURES

### *Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage*

Figure I.1. Schéma technique décrivant le mécanisme de soudage par friction malaxage [43].....	12
Figure I.2. Plateforme de soudage par friction malaxage assisté électriquement (a) Représentation schématique de l'installation complète. (b) Schéma de l'outil utilisé pour l'EFSW. ....	13
Figure I.3. Détails concernant l'outil de soudage par friction malaxage auto-réactif [59] .....	14
Figure I.4. Schémas du procédé conventionnel de Soudage par Points par Friction Malaxage : (a) Rotation, (b) Plongée, (c) Malaxage (temps de maintien), (d) Retrait.[65] .....	14
Figure I.5. Les trois phases de procédé de soudage FSW [67].....	15
Figure I.6. Évaluation et comparaison de la température suivant la ligne de soudage pour différentes valeurs de la vitesse de rotation, mais à vitesse de soudage constante. (Période de pénétration) [70].....	16
Figure I.7. Évaluation et comparaison de la température suivant la ligne de soudage pour différentes valeurs de la vitesse de rotation et à vitesse de soudage constante (Période de soudage) [70]......	17
Figure I.8. Trou à la fin de soudure [71].....	17
Figure I.9. Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, et (d) angle [30].....	18
Figure I.10. Vue en coupe transversale du joint soudé: a) Noyau ; b) Zone affectée thermomécaniquement (ZATM) ; c) Zone affectée thermiquement (ZAT) et d) Matériau de base.....	20
Figure I.11. Effet de la vitesse de rotation sur la résistance à la traction [9].....	22
Figure I.12. Effet de la vitesse de soudage sur la résistance à la traction [9] .....	23
Figure I.13. Effet de la force de plongée de l'outil sur la formation du joint. [110].....	24
Figure I.14. Les paramètres du procédé FSW.....	25

Figure I.15. Les technologies d'outils existants (a) Outil conventionnel, (b) Outil à pion rétractable et (c) Outil à deux épaulements et un pion ajustable verticalement. ....	25
Figure I.16. Ares I.....	30
Figure I.17. (a) : Des supports de lumières, (b) : Des tôles en CU-OF,(c) Des éléments de générations .....	31

## ***Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience***

Figure II.1. Schéma simplifié de l'environnement d'un système donné .....	37
Figure II.2. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs .....	38
Figure II.3. L'espace expérimental .....	38
Figure II.4. La surface de réponse. ....	40
Figure II.5. L'optimisation de la réponse .....	40
Figure II.6. Plans factoriels complets $2^2$ et $2^3$ .....	43
Figure II.7. Plans factoriels complets $3^2$ et $3^3$ .....	47

## ***Chapitre III : Méthodes expérimentales***

Figure III.1. Schéma du procédé FSW [66].....	59
Figure III.2. Régions/interfaces de l'entrée des énergies et de la géométrie de l'outil du procédé FSW.....	60
Figure III.3. Position des thermocouples de part et d'autre de la surface de contact.....	61
Figure III.4. Zones de génération de chaleur entre les pièces et l'outil.....	65

## ***Chapitre IV: Interprétation des résultats de l'études expérimentales***

Figure IV.1. Schéma thermique des deux modèles (expérimental et théorique), (a) Entrée de chaleur des deux modèles par l'épaulement ( $Q_1$ ), (b) Entrée de chaleur des deux modèles par la broche de l'outil ( $Q_2$ ), et (c) Entrée de chaleur des deux modèles par le fond de le fond de l'outil ( $Q_3$ ).....	76
Figure IV.2. Représentation de l'effet du WS .....	79
Figure IV.3. Représentation de l'effet du TRS.....	80

Figure IV.4. Variation de la réponse en fonction du WS et du TRS ..... 82

Figure IV.5. Courbes de réponses en fonction de la variation de la réponse..... 83

## LISTE DES TABLEAUX

### *Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage*

Tableau I.1. Les technologies d'outils existants .....	26
--	----

### *Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience*

Tableau II.1. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets $2^2$ .....	483
--	-----

Tableau II.2. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets $2^3$ .....	44
--	----

Tableau II.3. Matrice d'expériences avec réponses pour un plan factoriel complet $2^2$ ..	45
---	----

Tableau II.4. Matrice d'expériences avec effets pour un plan factoriel complet $2^2$ .....	46
--	----

Tableau II.5. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets $3^2$ .....	488
--	-----

Tableau II.6. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets $3^3$ .....	49
--	----

Tableau II.7. Tableau d'ANOVA .....	54
-------------------------------------	----

### *Chapitre III : Méthodes expérimentales*

Tableau III.1. Composition chimique de l'alliage d'aluminium Al-MgSi (%) .....	59
--	----

Tableau III.2. Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium Al-MgSi .....	59
---	----

Tableau III.3. Composition chimique (% en poids) du matériau de l'outil X153CrMoV12. ....	60
---	----

Tableau III.4. Température obtenue par les tests expérimentaux .....	61
--	----

Tableau III.5. Température et apport de chaleur obtenus par simulation .....	66
--	----

Tableau III.6. Valeurs des paramètres codés .....	67
---	----

Tableau III.7. Tableau récapitulatif des facteurs et les interactions .....	68
---	----

Tableau III.8 Les valeurs des coefficients polynomiaux pour chacune des trois zones de l'outil .....	71
--	----

Tableau III.9. Réponses prédites et observée pour chacune des trois zones de l'outil....	71
Tableau III.10. Les écarts types pour chacune des trois zones de l'outil .....	72
Tableau III.11. Les valeurs carrées des écarts types pour chacune des trois zones de l'outil. ....	72

#### ***Chapitre IV: Interprétation des résultats de l'études expérimentales***

Tableau IV.1. ANOVA pour l'apport de chaleur par l'épaule ( $Q_1$ ).....	77
Tableau IV.2. ANOVA pour l'apport de chaleur de la broche de l'outil ( $Q_2$ ).....	77
Tableau IV.3. ANOVA pour l'apport de chaleur du fond de l'outil ( $Q_3$ ).....	77
Tableau IV.4. Résultats des différentes valeurs de paramètres pour l'apport de chaleur de l'épaule ( $Q_1$ ) .....	83
Tableau IV.5. Résultats des différentes valeurs de paramètres pour l'apport de chaleur de l'axe de l'outil ( $Q_2$ ) .....	84
Tableau IV.6. Résultats des différentes valeurs de paramètres pour l'apport de chaleur du fond de l'outil ( $Q_3$ ) .....	84

## LISTE DES ABBREVIATIONS

FSW	Friction Stir Welding
AA	Aluminum Alloy
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
FE	Faisceau d'Electrons
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
MAG	Métal Active Gas
DMOS	Descriptif de Mode Opérateur de Soudage
FEA	Finite Element Analysis
DFC	Dynamique des Fluides Computationnelle
RSM	Response Surface Methodology
AS	Advancing Side
RS	Retreating Side
HDPE	High-Density PolyEthylene
SZ	Stirred Zone
HAZ	Heat-Affected Zone
CPT	Cubic Pin
FPT	Frustum Pin
TPT	Triangular Pin
CEL	couple Eulerien-Lagrangien
CSM	Computational Solid Mechanics
CFD	Computational Fluid Dynamics
TWI	The Welding Institute
ZAT	Zone Affectée Thermiquement

ZATM	Zone Affectée ThermoMécaniquement
MPE	Méthode des Plans d'Expériences
D.O.E	Design Of Experiment
VD	Variable Dépendante
VI	Variables Indépendantes
ANOVA	Analysis Of Variance
STCE	Somme Totale des Carrés des Écarts
SCEL	Somme Totale des Carrés dus à la Liaison
SCER	Somme des Carrés des Écarts des Résidus
CML	Carré Moyen pour la Liaison
CMR	Carré Moyen pour les Résidus
CMT	Carré Moyen Total
TRS	Tool Rotation Speed
WS	Welding Speed
OA	Orthogonal Array

# Sommaire

REMERCIEMENTS

DÉDICACES

RÉSUMÉ

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABBREVIATIONS

INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 1

## *Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage*

I.1. INTRODUCTION ..... 4

I.2. LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE FSW (FRICTION STIR WELDING)..... 4

I.2.1. ÉTAT DE L'ART CONCERNANT LE DOMAINE DE RECHERCHE..... 4

I.2.2. DÉFINITION..... 11

I.2.3. VARIANTES DU FSW ET DES MÉTHODES CONNEXES ..... 12

I.3. LE PRINCIPE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE FSW ..... 15

I.3.1. PHASE DE PLONGÉE..... 15

I.3.2. PHASE DE SOUDAGE..... 16

I.3.3. PHASE DE RETRAIT..... 17

I.4. LES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS POSSIBLES POUR LE SOUDAGE FSW ..... 18

I.5.	LES MATÉRIAUX CONSIDÉRÉS.....	19
I.5.1.	MATÉRIAUX SOUDABLES PAR FSW .....	19
I.5.2.	POSSIBILITÉ D'ASSEMBLAGE HÉTÉROGÈNES .....	20
I.6.	STRUCTURE GÉNÉRALE DES ASSEMBLAGES OBTENUS PAR FSW (LA MICROSTRUCTURE) .....	20
I.6.1.	LA ZONE AFFECTÉE THERMIQUEMENT (ZAT ; HAZ : HEAT AFFECTED ZONE) .....	20
I.6.2.	LA ZONE AFFECTÉE THERMOMÉCANIQUEMENT (ZATM; TMAZ THERMO- MECHANICALLY AFFECTED ZONE) .....	21
I.6.3.	LE NOYAU SOUDÉ (NUGGET).....	21
I.7.	PARAMÈTRES DU SOUDAGE FSW .....	21
I.7.1.	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ .....	21
I.7.2.	PARAMÈTRES OUTILS.....	25
I.8.	AVANTAGE ET INCONVÉNIENTS DU FSW .....	27
I.8.1.	AVANTAGES .....	27
I.8.2.	INCONVÉNIENT .....	29
I.9.	LES DOMAINES D'APPLICATIONS .....	29
I.9.1.	DOMAINE AUTOMOBILE .....	29
I.9.2.	DOMAINE FERROVIAIRE.....	30
I.9.3.	DOMAINE AÉRONAUTIQUE.....	30
I.9.4.	DOMAINE SPATIAL.....	30
I.9.5.	AUTRES DOMAINES D'APPLICATION .....	31
I.10.	CONCLUSION.....	31
 <b><i>Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience</i></b> 		
II.1.	INTRODUCTION.....	32

II.2. PLANS D'EXPÉRIENCES .....	33
II.2.1. DÉFINITION .....	33
II.2.2. LES ÉTAPES DE LA DÉMARCHE DES PLANS D'EXPÉRIENCES .....	35
II.2.3. LES AVANTAGES .....	35
II.3. LA MÉTHODE DE SURFACE DE RÉPONSE (MSR) .....	36
II.3.1. DÉFINITION .....	36
II.4. NOTION D'ESPACE EXPÉRIMENTAL .....	37
II.5. NOTION DE SURFACE DE RÉPONSE .....	39
II.6. OBJECTIF DE MODÉLISATION .....	39
II.6.1. OBJECTIF DE PRÉDICTION .....	39
II.6.2. OBJECTIF D'OPTIMISATION .....	40
II.7. PRINCIPES DE BASE DE LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE.....	41
II.7.1. LES ASPECTS CLÉS DE LA RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE DANS LE CONTEXTE DE LA MODÉLISATION .....	41
II.7.2. VARIABLES CODÉES .....	42
II.8. PLANS FACTORIELS .....	42
II.8.1. PLANS FACTORIELS COMPLETS À DEUX NIVEAUX .....	42
II.8.2. PLANS FACTORIELS COMPLETS À TROIS NIVEAUX.....	47
II.8.3. RÉGRESSION LINÉAIRE ET ANALYSE DU MODÈLE.....	51
II.9. LOGICIELS DE PLANS D'EXPÉRIENCES .....	55
II.10. CONCLUSION .....	56

### *Chapitre III : Méthodes expérimentales*

III.1. INTRODUCTION .....	58
---------------------------	----

III.2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTALE .....	58
III.2.1. MATÉRIAU DE BASE .....	58
III.2.2. OUTILS DE SOUDAGE.....	60
III.2.3. MACHINE DE SOUDAGE .....	60
III.2.4. ESSAIS RÉALISÉS .....	61
III.3. MODÈLE ANALYTIQUE POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR.....	62
III.3.1. GÉNÉRATION DE CHALEUR DEPUIS L'ÉPAULEMENT.....	64
III.3.2. GÉNÉRATION DE CHALEUR DEPUIS LA SURFACE LATÉRALE DU PION.....	64
III.4. MODÉLISATION DU PHÉNOMÈNE.....	66
III.4.1. CALCUL DES EFFETS DES FACTEURS .....	66
III.4.2. CALCUL INTERACTION ENTRE LES DEUX FACTEURS .....	67
III.4.3. RÉALISATION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE.....	68
III.5. VALIDATION DU MODÈLE .....	70
III.5.1. VARIATION RÉSIDUELLE .....	70
III.5.2. CALCUL DES RÉSIDUS .....	71
III.5.3. VARIATION DUE À LA LIAISON LINÉAIRE.....	73
III.5.4. VARIATION RÉSIDUELLE .....	73
III.5.6. CALCUL DE LA VARIATION TOTALE .....	73

*Chapitre IV: Interprétation des résultats de l'études expérimentales*

IV.1. INTRODUCTION .....	75
IV.2. VALIDATION DU MODÈLE.....	77
IV.3. EFFET DES PARAMÈTRES PRINCIPAUX.....	78
IV.4. CONCLUSION.....	85

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	86
PERSPECTIVES .....	87
BIBLIOGRAPHIE.....	88

**Introduction**

**Générale**

# Introduction Générale

---

## Introduction générale

Les alliages d'aluminium sont hautement valorisés pour leur légèreté exceptionnelle et leur résistance à la corrosion, occupant ainsi une place centrale parmi les matériaux. Composés essentiellement d'aluminium en association avec d'autres éléments, ces alliages sont largement adoptés dans des secteurs variés, notamment l'aérospatiale et l'automobile, offrant des solutions structurales à la fois légères et solides. Ils sont devenus des matériaux incontournables pour des applications exigeant à la fois légèreté et performances mécaniques élevées. Le recours au soudage de l'aluminium, spécifiquement avec la technique du Friction Stir Welding (FSW), présente des bénéfices significatifs.

Soudage par Friction-Malaxage est une technique de soudage innovante qui implique le frottement et la malaxation de deux pièces métalliques pour les joindre. Le soudage par friction-malaxage ne nécessite pas de fusion du métal, Cette méthode présente des avantages significatifs en termes de qualité du joint, de réduction des déformations et de consommation d'énergie.

Cette étude se concentrera sur l'analyse approfondie des aspects thermiques et mécaniques de ce processus de soudage particulier. Cela implique d'analyser comment la chaleur interagit pendant le soudage, ainsi que comment ces interactions affectent la microstructure, les propriétés mécaniques et la qualité de la soudure.

Du point de vue thermique, nous examinerons les sources de chaleur impliquées, telles que la friction entre les pièces. Comprendre comment la chaleur est distribuée et gérée est essentiel pour garantir la qualité de la soudure. L'étude inclura également l'analyse des gradients thermiques à différentes profondeurs dans la zone affectée par la chaleur.

Sur le plan mécanique, Cela se concentre sur les forces mécaniques, les déformations induites, les contraintes résultantes et les propriétés mécaniques des matériaux lors du processus de soudage. Comprendre ces aspects mécaniques est crucial pour évaluer la stabilité et la durabilité des soudures réalisées par cette méthode.

La modélisation du soudage par friction malaxage repose sur une méthodologie précise. Initialement, des expériences contrôlées sont menées, variant les paramètres clés tels que la vitesse de rotation et la vitesse de soudage. Cette méthode permet de minimiser le nombre

# Introduction Générale

---

d'essais tout en fournissant des modèles mathématiques précis qui décrivent les relations entre les variables du processus et les caractéristiques du joint soudé. Ces modèles facilitent la prédiction des caractéristiques du joint en fonction des conditions opératoires.

Le travail de thèse s'inscrit dans le contexte de l'analyse thermomécanique et se concentre sur la modélisation des paramètres opératoires pour optimiser la qualité du joint soudé et assurer des soudures de haute qualité dans le processus de soudage par friction malaxage. Offrant ainsi des informations précieuses pour son application efficace dans divers domaines industriels. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est modélisation du transfert de chaleur et simulation numérique et développer et appliquer des modèles de transfert de chaleur et des simulations numériques pour comprendre le FSW, en mettant l'accent sur l'impact de la vitesse de soudage et de la vitesse de rotation et comment les variations des principaux paramètres de soudage affectent les aspects thermiques et mécaniques du FSW.

Cette étude se concentre sur la réalisation des expériences pratiques de FSW pour valider les résultats numériques et garantir l'applicabilité de l'étude dans le monde réel. Et Comparer les résultats de la recherche avec les études existantes sur le FSW afin d'évaluer leurs contributions uniques et leur importance dans le domaine.

Le contenu de la thèse s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique introduit le principe général du soudage par friction malaxage et ses différents domaines d'application industrielle, En outre, nous examinerons en détail les paramètres essentiels qui influent sur la qualité des soudures réalisées par friction malaxage.

Le deuxième chapitre se base sur la modélisation des plans d'expériences. Cette section explore en détail la méthodologie des plans d'expériences, mettant l'accent sur la conception et la réalisation d'essais. Ce chapitre examine comment ces plans d'expériences permettent d'analyser et d'optimiser les conditions opératoires pour obtenir des résultats optimaux en termes de qualité de soudure.

Le troisième chapitre se concentre sur les méthodes expérimentales, un aspect crucial de la recherche scientifique. Ce chapitre explore en détail les principes et les pratiques utilisés pour concevoir, mettre en œuvre et analyser des expériences afin de tester des hypothèses.

## Introduction Générale

---

Le quatrième chapitre de ce travail de recherche constitue une étape cruciale où les résultats expérimentaux obtenus sont examinés, discutés et interprétés. Dans cette section, On repose sur l'utilisation d'une approche de simulation et de modélisation pour générer trois interfaces principales de production de flux thermique entre l'outil de soudage et la pièce à travailler. Les données de température ont été obtenues en réalisant neuf expériences sur des feuilles de l'alliage Al-MgSi. L'effet des paramètres principaux tel que la vitesse de rotation de l'outil et la vitesse de soudage sur l'apport thermique a été modélisé. Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude devraient permettre une utilisation plus efficace de l'énergie fournie, favoriser une amélioration de l'efficacité énergétique du processus, et élever le niveau de qualité des soudures. Une démarche d'optimisation de la méthodologie de la surface de réponse (RSM) du flux thermique est également entreprise pour garantir une qualité de soudage optimale.

Enfin, ce travail doctoral atteint son point culminant avec la rédaction d'une conclusion générale et l'exploration des perspectives futures. La conclusion synthétise les principaux enseignements tirés de la recherche, réaffirme les contributions majeures, et peut également mettre en avant les limites de l'étude. Les perspectives offrent un regard vers l'avenir, suggérant des pistes de recherche potentielles, des développements possibles, et invitant d'autres chercheurs à s'engager dans ce domaine.

# Chapitre I

# **Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage**

---

## **I.1. Introduction**

Parmi les méthodes d'assemblage les plus répandues dans l'industrie est le soudage [1], ce domaine a connu une transformation importante au cours des décennies, avec l'émergence de nouvelles technologies dans le but d'améliorer l'efficacité, la qualité et la variété des jonctions soudées dans l'industrie. Parmi ces meilleures innovations, le procédé de soudage par friction-malaxage qui est connu sous le terme FSW s'est distingué comme une méthode révolutionnaire, offrant des avantages remarquables dans la réalisation de jonctions métalliques. Il est particulièrement efficace pour souder des alliages réputés difficiles à travailler avec des techniques de soudage conventionnelles.

Dans ce chapitre, nous présenterons en détail le principe physique du soudage par friction malaxage, les différentes étapes du procédé, les systèmes utilisés ainsi que les principaux paramètres influençant la qualité du joint soudé, ainsi que les applications industrielles qui ont bénéficié de cette méthode novatrice. En examinant l'état actuel de l'art du Soudage FSW. Nous aborderons également les caractéristiques métallurgiques et mécaniques des assemblages obtenus par cette technique innovante.

## **I.2. Le soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Welding)**

### **I.2.1. État de l'art concernant le domaine de recherche**

Serii et al. [2] ont étudié la modélisation thermomécanique du soudage par friction malaxage, particulièrement adapté à l'assemblage d'alliages d'aluminium. Ils ont présenté une première modélisation du processus dans le logiciel d'éléments finis ABAQUS/Explicit, avec l'objectif à long terme de fournir un outil prédictif pour déterminer les paramètres de soudage optimaux. Cette étude a exploré différentes approches, en tenant compte de la complexité et des mesures expérimentales comme données d'entrée. Les simulations numériques ont prédit efficacement les champs de températures et mécanique.

Elangovan et Balasubramanian [3] ont étudié le soudage par friction malaxage de l'alliage d'aluminium AA2219, durant cette étude, ils se sont concentrés sur l'effet de la vitesse de rotation et du profil de la broche de l'outil sur la formation de la zone traitée par frictionmalaxage et sur les propriétés de traction des joints. Ils ont obtenu que le profil de goupille de forme carrée a produit des soudures mécaniquement solides, saines et exemptes de défauts métallurgiques par rapport aux autres profils de goupilles.

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

Sakthivel et al. [4] ont concentré leurs études sur l'impact de différentes vitesses de soudage par friction malaxage sur les propriétés des soudures en aluminium avec une vitesse de rotation constante de 1000 tr/min. Ils ont utilisé deux plaques d'aluminium de dimensions 300×150×6 mm et un outil en acier durci pour le soudage et analyse les propriétés mécaniques et la microstructure des soudures, Une bonne corrélation a été observée entre les propriétés mécaniques et les vitesses de soudage. Ils ont conclu que les meilleures propriétés mécaniques sont obtenues à une vitesse de soudage inférieure.

Guedoiri et al. [5] ont utilisé une plaque en alliage d'aluminium 6061, mesurant long 50 mm et d'épaisseur égale à 6 mm, pour simuler le soudage par friction-malaxage (FSW). Ils ont modélisé une zone réduite, égale à 50% de la longueur totale de la plaque, utilisant un outil de soudage en acier avec une broche de 5 mm de diamètre et une épaulement de 10 mm de diamètre, totalisant une longueur de 30 mm. Les paramètres du processus FSW étaient fixés à une vitesse de soudage égale à 1 mm/s et une vitesse de rotation égale à 42 rad/s. L'objectif principal était d'analyser les conditions limites thermiques optimales pour cette zone spécifique et leur impact sur la simulation du FSW. À cette fin, ils ont développé deux modèles intégrés : un modèle thermomécanique dédié à la région adjacente à l'outil de soudage et un autre modèle thermique pour l'ensemble de la pièce, y compris l'outil et la plaque de support en acier. Une approche itérative a été utilisée pour parvenir à la convergence des modèles.

Jemal [6] a utilisé des modèles thermomécaniques pour examiner l'écoulement du matériau et la distribution de la température pendant le soudage par friction-malaxage afin de mettre en évidence leur efficacité dans la prévision des contraintes résiduelles, des forces et des déformations, en soulignant le rôle crucial du soudage par friction-malaxage, en particulier face aux difficultés de mesure de la température dans les zones soumises à une forte déformation plastique. Leur étude a donc contribué à développer et à améliorer la technique du FSW. En outre, ils ont recommandé d'améliorer les modèles thermomécaniques existants en affinant les hypothèses et en augmentant la précision des équations mathématiques dans les études futures.

Xiaocong et al. [7] Les auteurs présentent une analyse détaillée et exhaustive des récentes publications concernant l'utilisation des méthodes éléments finis pour étudier le comportement thermomécanique du soudage par friction-malaxage (FSW). Ils se concentrent sur l'emploi de modèles thermomécaniques pour examiner le flux de matière et la distribution de la température durant le FSW. Ils ont mis en lumière l'efficacité de ces modèles pour prévoir les contraintes, forces, et déformations résiduelles, soulignant ainsi le rôle clé de la FEA particulièrement face

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

aux difficultés de mesurer la température dans des zones subissant une forte déformation plastique. Ainsi, cette étude offre une contribution importante dans l'approfondissement et l'amélioration de la technique FSW. Pour les futures recherches, les auteurs recommandent de se concentrer sur l'amélioration des modèles thermomécaniques existants, en affinant les hypothèses et en augmentant la précision des équations mathématiques. Ils insistent sur l'importance de valider ces modèles numériques expérimentalement pour garantir leur fiabilité et précision dans la prédiction du comportement des joints FSW, et de prendre en compte l'impact de divers outils et paramètres de processus sur le comportement thermomécanique des joints, ce qui constitue un axe de recherche essentiel pour l'avenir.

Une simulation numérique des problèmes thermomécaniques du FSW a été étudiée par Dialami et al. [8]. Leur analyse vise à étudier l'effet d'une source de chaleur mobile sur une structure entière. En outre, elle s'est concentrée sur la zone affectée thermiquement au niveau local. Leur étude a mis en évidence plusieurs aspects de la modélisation du FSW, notamment la formulation du modèle, les techniques de stabilisation, la modélisation constitutive, la visualisation de l'écoulement des matériaux et le calcul des contraintes résiduelles. Ils ont présenté les défis associés à la complexité des phénomènes thermomécaniques et à la nécessité de prendre en compte l'effet d'une vitesse de rotation élevée, en se concentrant sur l'analyse de la zone affectée thermiquement, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des processus de soudage.

Serier et al. [9] ont examiné l'effet de la vitesse de rotation ainsi que l'effet de la vitesse de soudage, et aussi de la force axiale de l'outil, regroupés dans un modèle mathématique, pour quantifier leurs influences sur la soudure. Le but de cette étude est de décrire la résistance à la traction du cordon résultant de cette opération de soudage pour la qualification de ce type de pièces dans une application donnée. Les résultats de l'étude ont révélé que la résistance du joint soudé à la traction est principalement conditionnée par la vitesse de rotation de l'outil, la plus basse offrant une meilleure résistance, et que la combinaison de la vitesse de soudage et de la force axiale n'affecte pas significativement cette résistance.

Serier et al. [10] se sont concentrés sur l'analyse des principaux paramètres affectant le soudage par friction-agitation (FSW) et l'impact de l'élasticité des matériaux soudés. Dans cette étude, des plaques en alliage 7075-T5 ont été soudées (100×100×4 mm). Les résultats ont montré que le retour élastique peut être minimisé en utilisant des vitesses élevées pour l'outil et le processus de soudage, tandis que la force axiale a un effet négligeable. Le modèle a été validé

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

à l'aide du test de Fisher, confirmant son importance globale. L'optimum a été atteint avec une vitesse de rotation de 1400 tr/min, une vitesse de soudage de 75 mm/min et une force axiale de 4 KN, produisant le moindre retour élastique. En conclusion, l'étude a établi un modèle prédictif efficace pour combiner le soudage FSW et le pliage.

Soori et al. [11] ont utilisé la méthode des éléments finis (MEF) pour simuler et analyser l'écoulement du matériau pendant le FSW. Ils ont constaté que l'influence de facteurs de soudage spécifiques, tels que la rotation de l'outil et la vitesse de soudage, l'angle de l'outil, la profondeur de l'outil et le diamètre de l'épaulement, peut être analysée et optimisée pour augmenter l'efficacité du processus de production.

Singh et al. [12] ont présenté un travail se concentrant sur l'alliage d'aluminium AA 6061-T6. En utilisant la technique des éléments finis, ils ont analysé la distribution de la température et des contraintes thermiques pendant le soudage par friction-agitation. L'impact du diamètre de l'épaulement de l'outil et de l'angle de cône a été comparé concernant la température maximale et les contraintes thermiques résultantes. Leurs résultats ont indiqué qu'un outil avec un diamètre de 24 mm et un angle de cône de  $7^\circ$  atteint une température maximale de 730,69 K, dépassant celle obtenue avec un outil à épaulement plate du même diamètre de plus de 6%. La contrainte thermique de traction maximale a été obtenue en utilisant un outil à épaulement plate avec un diamètre de 24 mm.

Kumar et al. [13] ont examiné le soudage par friction-agitation de deux alliages d'aluminiums différents, AA2014 et AA7075, pour étudier l'impact des paramètres de soudage tels que la vitesse de soudage, l'angle d'inclinaison de l'outil et la vitesse de rotation sur les propriétés en traction des joints soudés par ce procédé. Ils ont conclu que l'angle d'inclinaison de l'outil avait un effet plus significatif sur les propriétés de soudure que les deux autres paramètres.

Khalaf et al. [14] ont examiné les effets du refroidissement par eau sur les contraintes résiduelles dans le soudage par friction-agitation (FSW) de l'AA6068-T6. La méthode de la dynamique des fluides computationnelle (DFC) a été utilisée pour simuler la génération de chaleur dans les processus de FSW et de FSW submergé. Les résultats montrent que le ramollissement du matériau pendant le FSW est plus prononcé que dans le FSW submergé, conduisant à des contraintes résiduelles plus faibles dans les cas submergés. Cependant, les contraintes résiduelles maximales dans les deux scénarios sont inférieures à la limite d'élasticité de l'AA6068-T6.

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

Leon et al. [15] ont préparé un modèle thermomécanique basé sur le couple pour les outils à broche cylindrique en introduisant des facteurs de multiplication pour les profils de broche polygonale. Une analyse comparative entre le modèle analytique proposé et le modèle existant a été réalisée pour comprendre la précision du nouveau modèle. Il a été observé que la température maximale du processus est directement proportionnelle au nombre de côtés de la broche de l'outil.

Al-Sabur [16] a mené une analyse comparative de différentes recherches et approches pour prédire la résistance à la traction dans le contexte du FSW. Ses résultats démontrent la capacité de la méthode des surfaces de réponse (RSM) à fournir des prédictions précises et efficaces, ce qui est crucial pour améliorer ce processus et garantir la qualité des soudures. Les résultats de l'étude sont significatifs pour l'industrie du soudage, offrant des perspectives pour optimiser les techniques de FSW et développer des modèles prédictifs avancés. Il a également fourni des perspectives précieuses pour adopter des stratégies de modélisation avancées afin d'améliorer la qualité et la sécurité des soudures.

Sun et al. [17] ont décrit un test de soudage par point de friction pour mesurer le coefficient de friction à l'interface outil-pièce sous différentes vitesses de rotation de l'outil. Un modèle intégré de dynamique des fluides computationnelle (CFD) de FSW a été établi en ligne avec le coefficient de friction de la matrice et la limite de vitesse pour simuler le transfert de chaleur et de masse. Une distribution de vitesse limite plus réaliste a été atteinte. Une nouvelle méthode pour estimer la contrainte sur une ligne de courant a été proposée, en tenant compte du taux de contrainte sur la ligne de courant inverse. Ils ont étudié les influences de contrainte sur la section transversale de la soudure et ont montré que la contrainte est plus grande du côté avançant (AS) que du côté reculant (RS) et augmente à mesure que la distance à la surface de l'épaule diminue. La température maximale a été observée à l'avant du RS.

Khalaf et al. [18] ont présenté l'impact du profil de broche sur le soudage par friction (FSW) des joints en polyéthylène haute densité (HDPE). Des formes de broche tronquées, cubiques et triangulaires ont été étudiées pour leurs effets sur la génération de chaleur et le flux. Il a été constaté que les broches avec plus de bords généraient plus de chaleur, influençant la vitesse du matériau dans la zone de brassage et la taille de la zone brassée (SZ). Les principales conclusions de leur étude sur les effets des profils de broche sur les phénomènes thermomécaniques du HDPE pendant le soudage par friction sont les suivants : la chaleur générée était maximale dans les échantillons utilisant un profil de broche CPT, atteignant

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

environ 96 °C, soit 6% de plus que dans les échantillons FPT, où la chaleur atteignait 91 °C. Cette augmentation de la chaleur dans les échantillons CPT a entraîné un plus grand flux de chaleur et la formation d'une zone brassée (SZ) plus grande, avec des tailles de SZ allant de 17 mm<sup>2</sup> à 21 mm<sup>2</sup> pour les broches FPT, TPT et CPT, environ trois fois plus grandes que celles de la zone affectée par la chaleur (HAZ). En outre, la vitesse du matériau dans le SZ a augmenté avec le nombre de bords de broche, provoquant un flux interne irrégulier de HDPE, ce qui a augmenté le sur-brassage et le piégeage de l'air dans la ligne de joint.

Asmare et al. [19] ont basé sur l'optimisation des paramètres de soudage par friction de l'alliage d'aluminium (FSW) 6061-T6. L'étude a utilisé une combinaison d'analyse relationnelle grise et d'un tableau orthogonal L9 pour optimiser des paramètres tels que le profil de l'outil, la vitesse de rotation et la vitesse transversale. Les propriétés mécaniques des joints soudés ont été examinées à travers des tests de traction, de dureté et de pénétrant liquide. Ils ont constaté que la résistance à la traction et la dureté sont directement proportionnelles à la vitesse de rotation et inversement proportionnelles à la vitesse transversale. La résistance à la traction la plus élevée a été observée à des vitesses de rotation plus élevées et à des vitesses transversales plus basses. La dureté a culminé à une vitesse de rotation de 1400 tr/min et une vitesse transversale de 37,5 mm/min. Les tests de pénétrant liquide ont montré que des vitesses de rotation plus élevées produisaient des joints sans défaut, tandis que des vitesses plus basses montraient certains défauts.

Boukraa et al. [20] ont préparé une simulation numérique de l'alliage AA2195-T8 pendant le FSW. Un modèle thermique transitoire 3D a été appliqué pour simuler le transfert de chaleur dans la phase de soudage. Le modèle considérait l'outil FSW comme une source de chaleur circulaire se déplaçant dans une plaque rectangulaire avec une surface de refroidissement soumise à des conditions limites non uniformes et non homogènes. Les résultats obtenus permettent de déterminer la valeur maximale de température dans la zone de joint soudé. Une analyse de sensibilité des paramètres opérationnels a également été menée pour déterminer le cycle thermique et la distribution de température pendant le soudage.

Serier et al. [21] ont proposé une approche innovante pour corriger les irrégularités mineures pendant le FSW en développant un outil à épaulement à ressort. L'objectif était d'obtenir une répartition uniforme des charges de soudage tout en réduisant la dissipation thermique de la région de soudage vers le corps de l'outil grâce à des mouvements vibratoires harmoniques. En outre, le forgeage harmonique du matériau en cours de traitement conduit à la formation de

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

jointes sans défaut. Une validation expérimentale a été réalisée en effectuant des expériences de FSW selon un plan orthogonal. Les résultats de ces expériences ont été modélisés et comparés avec des soudures réalisées à l'aide d'un outil FSW conventionnel, mettant en évidence la supériorité de la méthode proposée.

Veljić, D. et al. [22] ont analysé l'effet des paramètres du processus FSW sur le comportement thermomécanique de l'alliage d'aluminium Al 2024 T351. Ils ont utilisé un modèle d'éléments finis pour analyser l'effet de différentes vitesses de rotation et de soudage de l'outil. Ils ont conclu qu'une augmentation de la vitesse de rotation de l'outil contribue à une intensification de la chaleur générée par le frottement, tandis qu'une augmentation de la vitesse de soudage a un impact moindre sur la génération totale de chaleur.

Melaku et al. [23] se sont concentrés sur l'analyse thermique et l'optimisation des joints soudés en alliage AA 6061 par FSW à différentes vitesses de soudage, vitesses de rotation et géométries d'outils. L'objectif était d'obtenir un joint sans défaut en optimisant la température à l'aide de la méthode des éléments finis. Leurs résultats ont indiqué qu'un outil à épaulement concave avec une sonde conique produit un joint sans défaut avec une vitesse de rotation fixe de 1000 tr/min et une vitesse de soudage réglée à 20 mm/min.

Chalurkar et Shukla [24] ont utilisé un modèle thermomécanique fini 3D basé sur l'approche Couple Eulérien-Lagrangien pour simuler le processus FSW de l'alliage d'aluminium AA6061-T6 afin de résoudre les problèmes de déformation à grande échelle. Les résultats de la simulation - validés par des données expérimentales - ont montré que la température générée pendant les étapes de plongée, de maintien et de soudage dans le FSW de AA6061-T6 est de 80% à 90% de la température de fusion de l'alliage.

Mishin et al. [25] ont développé un modèle d'éléments finis pour simuler le comportement thermomécanique de l'alliage d'aluminium 6061 pendant le FSW. Ils ont montré que la déformation induite par le FSW est un processus en deux étapes : l'action de pétrissage exercée par la sonde rotative de l'outil et une déformation secondaire par le bord de l'épaulement dans la zone de pétrissage. Les effets des vitesses de rotation et de translation de l'outil sur la température et la contrainte du FSW ont également été systématiquement examinés, avec des températures de soudage allant de 360 à 500 °C et des contraintes cumulatives effectives variant de 12 à 45.

Salih et al. [26] ont développé un modèle numérique tridimensionnel thermomécanique pour simuler le processus de soudage par friction (FSW) de l'alliage d'aluminium AA 6082-T6 en

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

utilisant l'approche du Couple Eulérien-Lagrangien (CEL). Le modèle a réussi à simuler les phases de plongée, de maintien et de soudage du FSW, démontrant l'évolution de la température, de la déformation plastique et des contraintes résiduelles de l'assemblage soudé. Les résultats ont montré que la vitesse de rotation de l'outil influence significativement l'évolution de la température et de la qualité de la soudure, avec une augmentation de la température maximale et une réduction de la taille des défauts de type trous.

Sharma et al. [27] ont effectué une analyse numérique du soudage par friction (FSW), couvrant des aspects tels que les processus de soudage. Leurs résultats fournissent des aperçus sur diverses méthodes critiques de production de soudure et offrent une compréhension essentielle des mécanismes de construction du FSW pour l'acier, le titane et d'autres matériaux difficiles. Diverses techniques, telles que la mécanique solide computationnelle (CSM) et la dynamique des fluides computationnelle (CFD), ont été utilisées pour caractériser les principes du FSW et modéliser la génération de chaleur. La simulation de l'écoulement du matériel a été étudiée dans le cadre de l'approche de modélisation numérique. Les résultats synthétisent des techniques numériques et analytiques avancées pour le FSW de divers matériaux.

Singh et Yogesh [28] ont examiné le FSW de l'aluminium avec d'autres métaux. Ils se sont concentrés sur la conception d'un dispositif pour améliorer le transfert de chaleur pendant le FSW. Ils ont utilisé un réservoir supplémentaire comme moyen de refroidissement pendant le soudage pour contrôler le flux de chaleur et optimiser le transfert de chaleur pendant le FSW. Des analyses microstructurales et SEM ont été effectuées pour tous les échantillons, et les résultats ont indiqué une meilleure homogénéisation avec un affinement des grains.

## I.2.2. Définition

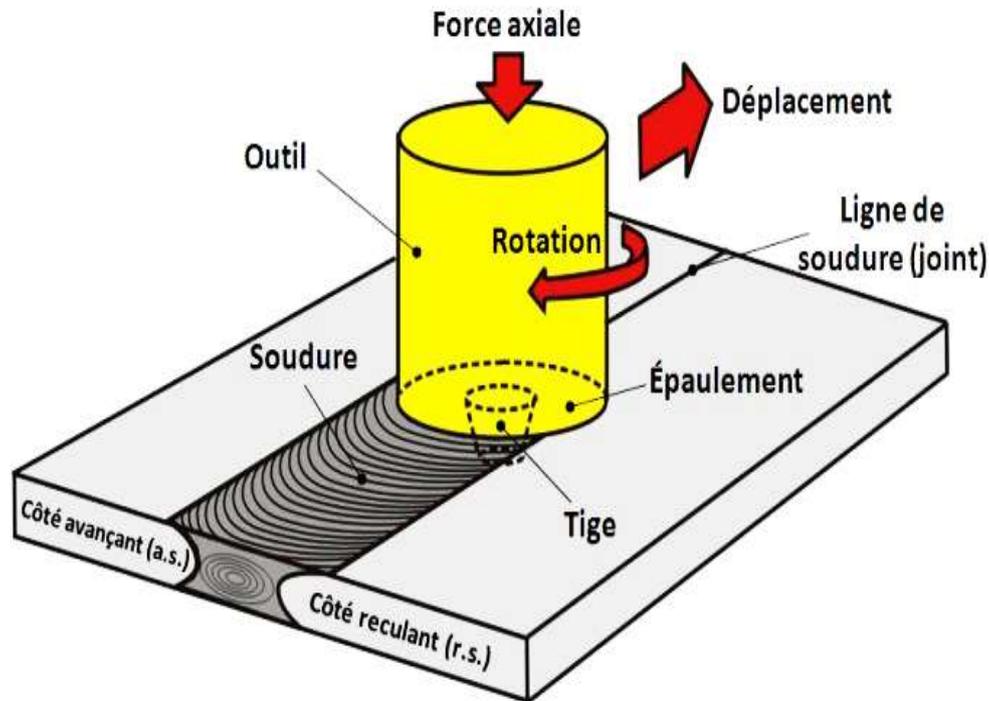
Le Friction Stir Welding, a été breveté par le TWI en 1991 [29], représente une avancée majeure dans le domaine du soudage [7, 30, 31]. Ce procédé révolutionnaire peut assembler un éventail étendu de matériaux, y compris des alliages complexes comme ceux de magnésium [32, 33], de cuivre, de zinc, d'acier, de titane [34-36] et les composites à matrice métallique [37,38]. Ce procédé est particulièrement respectueux de l'environnement, réduisant considérablement la consommation d'énergie et éliminant le besoin de consommables tout en évitant les émissions dangereuses typiques des procédés de soudage par fusion [39- 41].

Dans le soudage par friction malaxage, l'énergie nécessaire à l'assemblage des pièces provient de la conversion de l'énergie mécanique en chaleur, Cette chaleur permet de ramollir

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

les matériaux à souder, l'outil de soudage exerce une pression et tourne contre les pièces à souder, créant de la chaleur par friction qui permet de joindre les matériaux de manière efficace [42].



**Figure I.1.** Schéma technique décrivant le mécanisme de soudage par friction malaxage [43]

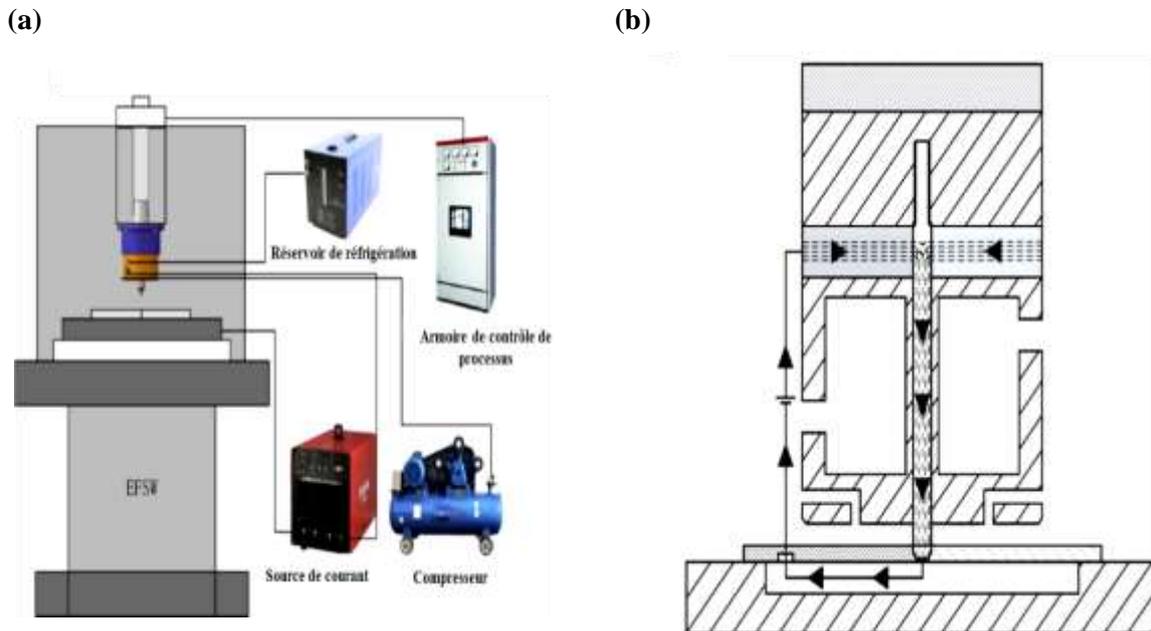
### I.2.3. Variantes du FSW et des méthodes connexes

#### a. Le soudage par friction malaxage assisté électriquement (EFSW : Electric Assisted FSW)

Le EFSW est une technique de soudage innovante du procédé de soudage par friction malaxage (FSW). Cette méthode vise à améliorer le processus de soudage en introduisant un courant électrique dans la zone de soudure [44,45]. L'assistance électrique permet un préchauffage localisé et un ramollissement du matériau avant le malaxage mécanique par l'outil FSW [46]. Cela réduit les forces requises sur l'outil et augmente les vitesses de soudage possibles [47,48]. L'EFSW peut offrir plusieurs avantages par rapport au FSW traditionnel, tels qu'un meilleur contrôle du procédé, des vitesses de soudage accrues de 50% ou plus, un des soudures de meilleure qualité dans certains matériaux, et un potentiel de soudage de matériaux difficiles [46,49]. Chen et al. [46] ont utilisé la soudure bout à bout en une seule passe pour créer une plateforme de soudage assistée par électrique, comme présenté dans la Figure I.2. Cette

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

plateforme comprend quatre systèmes : un système d'assistance électrique, un système d'isolation, un système de refroidissement et un système de protection gazeuse.



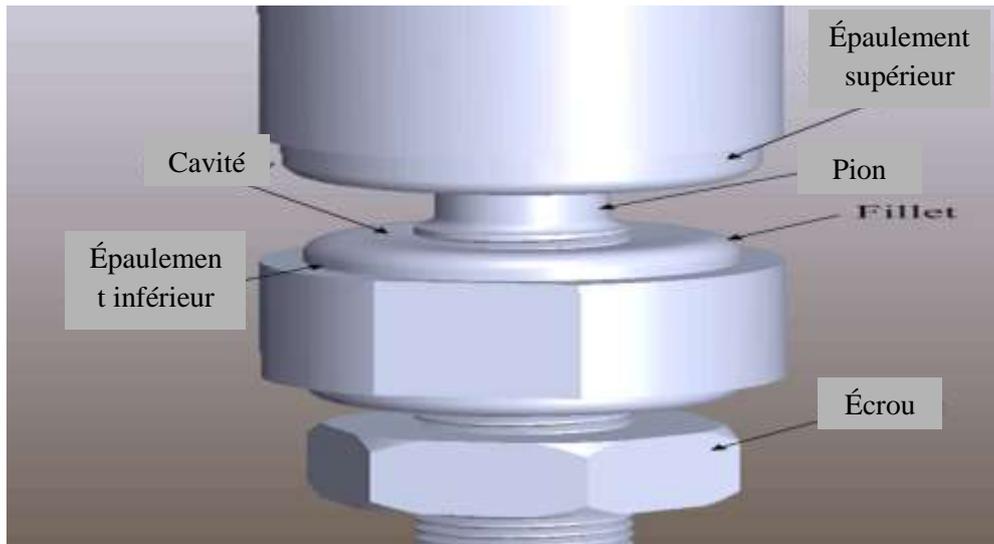
**Figure I.2.** Plateforme de soudage par friction malaxage assisté électriquement (a) Représentation schématique de l'installation complète. (b) Schéma de l'outil utilisé pour l'EFSW.

## b. Soudage par friction-malaxage pulsé (PFSW : Pulsed Friction Stir Welding)

Le soudage par friction malaxage pulsé est une variante du procédé FSW qui intègre des pulsations dans le processus de rotation de la broche, la vitesse de rotation de l'outil est modulée de façon périodique entre une valeur haute et une valeur basse [50, 51]. Cette technique peut présenter des avantages spécifiques par rapport au FSW conventionnel sont une meilleure qualité de soudure, des propriétés mécaniques améliorées, et un contrôle accru du processus [52, 53]. Les paramètres clés sont l'amplitude et la fréquence des pulsations [54].

## c. Soudage par friction-malaxage auto-réactif (SR-FSW : Self-Reacting Friction Stir Welding)

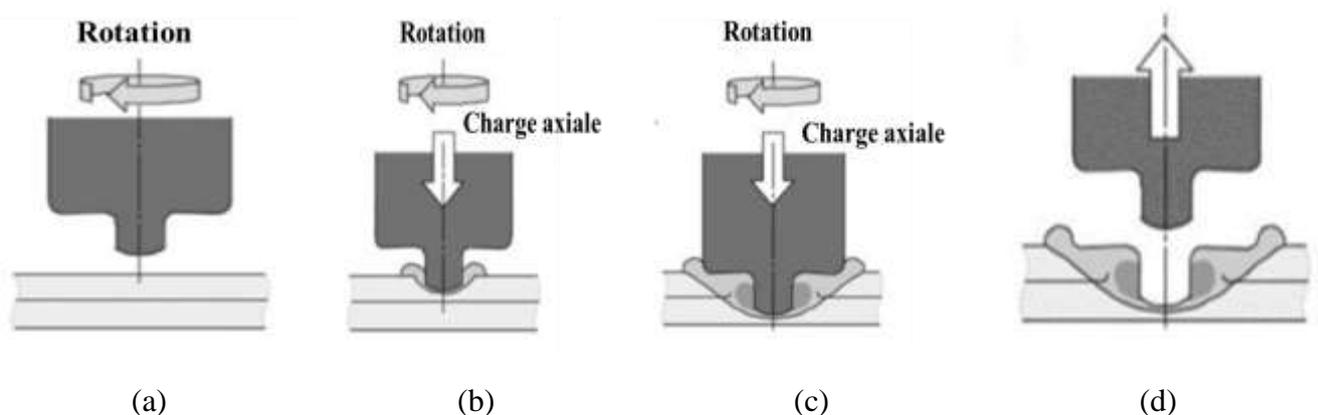
C'est une variante du procédé FSW qui implique l'utilisation de matériaux auto-réactifs pendant le processus de soudage [55]. Dans ce procédé, la rotation de l'outil génère une force de frottement sur la surface inférieure des tôles, créant une force de réaction suffisante pour le soudage [56, 57]. Le soudage par friction malaxage auto-réactif peut offrir des avantages tels qu'une réduction de la température de soudage, une diminution des défauts de soudure, et une amélioration des propriétés mécaniques du joint [58, 59].



**Figure I.3.** Détails concernant l'outil de soudage par friction malaxage auto-réactif [59]

### d. Le soudage par points par friction malaxage (FSSW : Friction Stir Spot Welding)

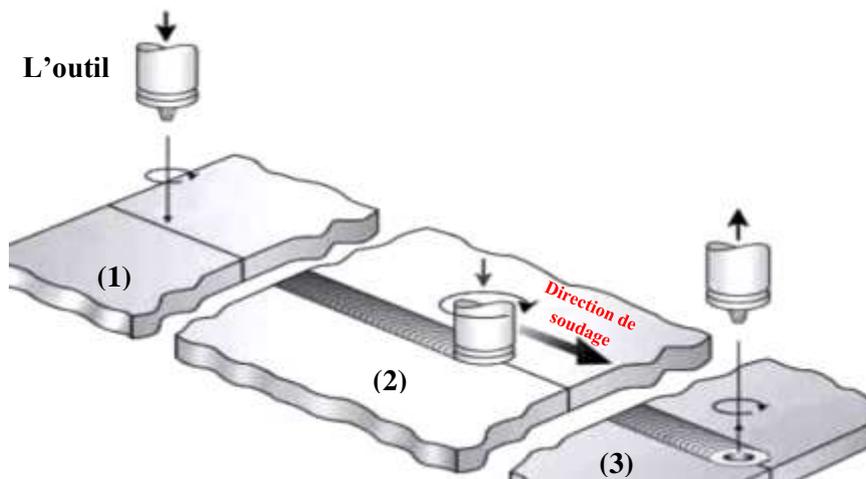
C'est une technique dérivée du procédé FSW [60]. Ce type utilise un outil rotatif plongeant à travers la tôle supérieure pour générer de la chaleur et malaxer localement les matériaux. Cela forme un point de soudure solide sans fusion complète du matériau [61]. Cette méthode se distingue du soudage par points conventionnel par l'utilisation de la friction comme source de chaleur [62]. Elle présente des avantages potentiels comme la réduction des déformations, l'augmentation de la productivité et l'amélioration de la qualité des joints à recouvrement. Toutefois, sa mise en œuvre nécessite des études approfondies pour ajuster les paramètres et valider la faisabilité du procédé. Des essais expérimentaux sont indispensables avant une application industrielle de cette approche innovante de soudage par points[63, 64].



**Figure I.4.** Schémas du procédé conventionnel de Soudage par Points par Friction Malaxage : (a) Rotation, (b) Plongée, (c) Malaxage (temps de maintien), (d) Retrait.[65]

## I.3. Le principe de soudage par friction malaxage FSW

L'étude thermique des différentes phases du soudage [66], y compris la phase de plongée, de soudage et de retrait, est souvent réalisée pour mieux comprendre le processus. Les thermocouples, bien qu'utiles pour mesurer les cycles thermiques, ne sont pas adaptés pour des mesures dans la zone affectée thermomécaniquement et pour évaluer les gradients de température dans des tôles fines. Face à ces limites, l'utilisation de caméras infrarouges représente une alternative viable pour une analyse thermique plus précise [42, 65].



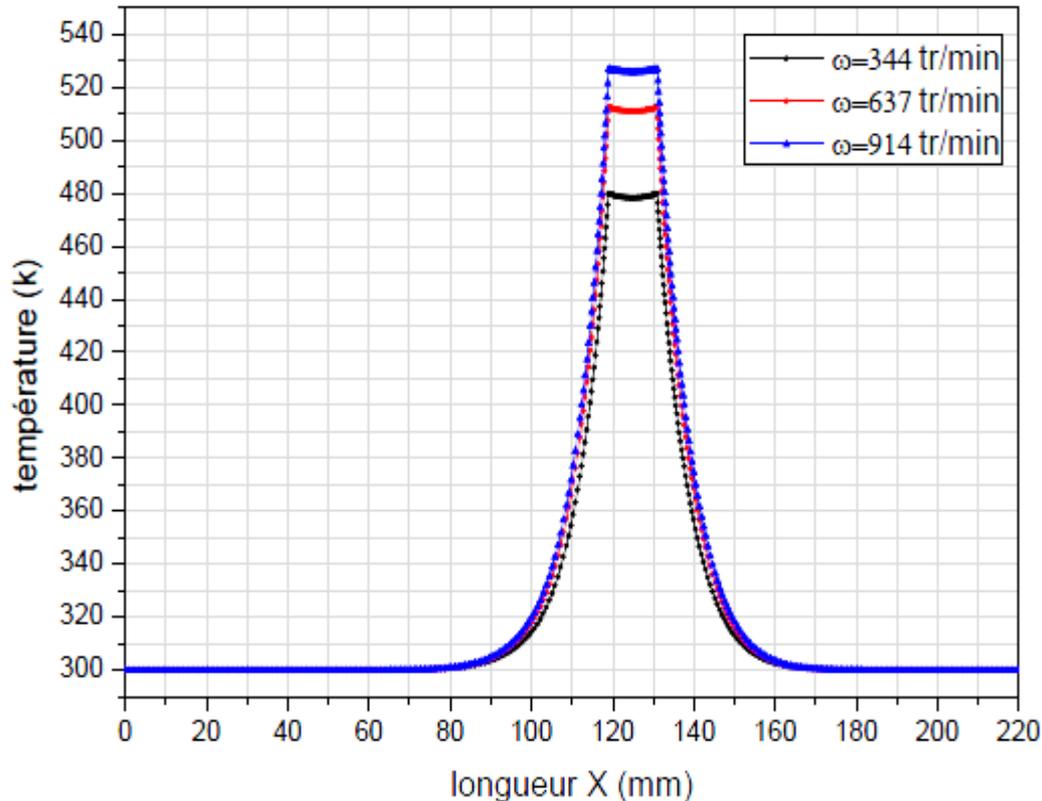
**Figure I.5.** Les trois phases de procédé de soudage FSW [67]

### I.3.1. Phase de plongée

Cette étape du processus de soudage, où l'outil est en contact avec les pièces à souder, a été l'objet de nombreuses études.

La rotation de l'outil génère une chaleur locale qui ramollit le matériau, facilitant ainsi sa pénétration dans le joint [68]. Les recherches menées par de Mutukhumaran et al. [69] indiquent que la force transversale exercée par le matériau sur l'outil tend à se diriger vers le côté avance.

Moustafa et al. [70] ont montré que la température atteint sa valeur maximale dans la zone de malaxage, d'autre part la température maximale augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation (trois valeurs de la vitesse de rotation 344, 637 et 914 tr/min et vitesse de soudage constante 1.59 mm/s). Cette augmentation est bien visible pendant la période de pénétration (Figure I.6).

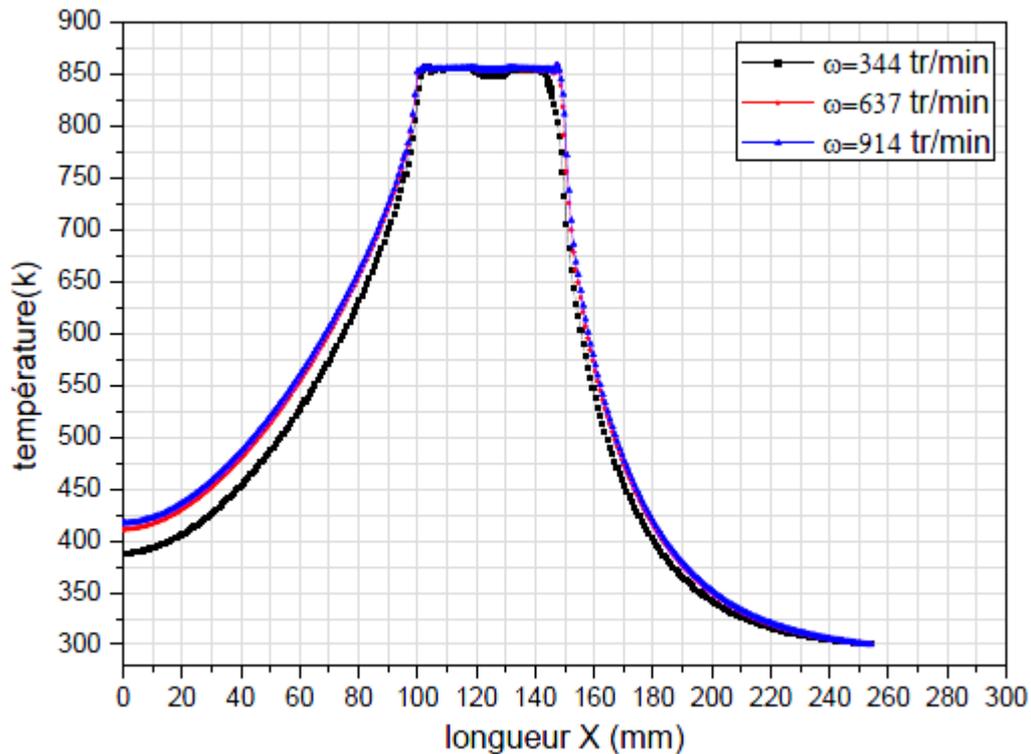


**Figure I.6.** Évaluation et comparaison de la température suivant la ligne de soudage pour différentes valeurs de la vitesse de rotation, mais à vitesse de soudage constante. (Période de pénétration) [70].

### I.3.2. Phase de soudage

L'outil de soudage est exposé à une force d'appui extrêmement élevée, qui peut s'élever jusqu'à 10 kN. Cette pression, combinée au frottement causé par la rotation de l'outil, amène le matériau à adopter une consistance pâteuse, ce qui contribue à faciliter le mouvement de l'outil[68].

Moustafa et al. [70] ont montré que pendant la période de soudage la température est négligeable (Figure I.6). Par contre, l'allure de la température reste presque en même forme en dehors de cette zone de malaxage le long de la ligne de soudage, pour les trois valeurs de la vitesse de rotation. Avec ces paramètres on remarque aussi que, la valeur maximale de la température aux points de contact outil/ pièce à souder sont proche à la température de fusion du matériau (Figure I.7).



**Figure I.7.** Évaluation et comparaison de la température suivant la ligne de soudage pour différentes valeurs de la vitesse de rotation et à vitesse de soudage constante (Période de soudage) [70].

### I.3.3. Phase de retrait

Dans la dernière phase du soudage par FSW, connue sous le nom de phase de retrait, l'outil se lève verticalement. La possibilité de laisser un trou à l'extrémité du joint dépend de la technologie de l'outil utilisé, ce qui doit être considéré dès la phase de conception des pièces à souder [68].

En outre, l'empreinte du pion peut rester dans le matériau, visible au point d'extraction du pion, en fonction du type d'outil utilisé [71].



**Figure I.8.** Trou à la fin de soudure [71].

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

## I.4. Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est principalement utilisé pour joindre des pièces minces bout à bout. Cependant, ce procédé est également adaptable à d'autres configurations de joints telles que le soudage d'angle, en "T", ou par superposition [30]. La figure I.9 présente les différentes configurations possibles pour le soudage FSW.

### a. Bout à bout

C'est une configuration classique en soudage par friction malaxage où deux tôles sont placées bout à bout avec leurs bords rectilignes et alignés[72]. L'outil de soudage se déplace le long de cette jonction droite pour réaliser le cordon de soudure entre les deux tôles [73].

### b. En coin

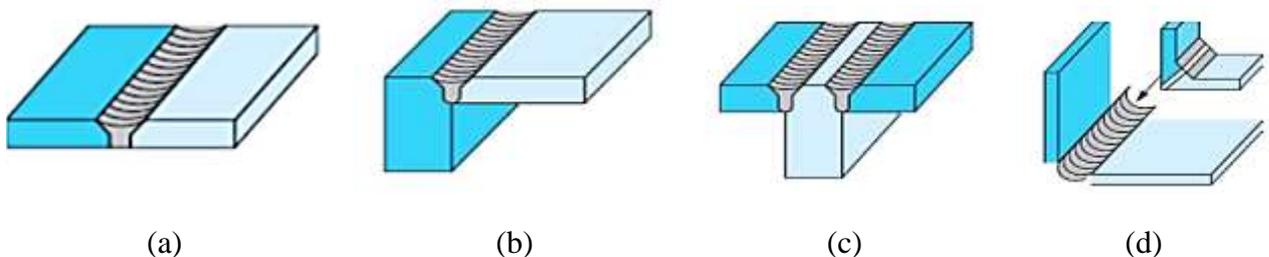
Dans ce type, les deux pièces à assembler sont positionnées de façon à former un angle droit entre elles. L'outil suit alors le contour de cette jonction angulaire, permettant de réaliser un cordon de soudure le long de l'arête intérieure formée par les deux tôles [74].

### c. En T

Assemblage perpendiculaire de deux pièces formant une jonction en **T** [75]. L'outil se déplace alors le long de cette jonction perpendiculaire, permettant de souder les deux pièces ensemble grâce au malaxage et à la chaleur générée par friction [76].

### d. Angle

Les deux pièces à assembler sont positionnées avec une certaine inclinaison entre elles [77]. L'outil suit alors le contour de cette jonction angulaire, permettant de réaliser un cordon de soudure le long du joint incliné formé par les deux tôles. L'angle entre les pièces peut être ajusté selon les besoins de conception de la structure [78].



**Figure I.9.** Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, et (d) angle [30]

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

## I.5. Les matériaux considérés

### I.5.1. Matériaux soudables par FSW

Le soudage par friction malaxage (FSW) est utilisé pour assembler des matériaux difficiles à souder par des méthodes conventionnelles. Les matériaux qui peuvent être soudés avec succès par FSW comprennent :

- **Alliages d'aluminium** : Le procédé de soudage par friction malaxage est très répandu pour assembler différents types d'alliages d'aluminium [79, 80], notamment les séries 2000, 5000, 6000 et 7000. Ces alliages d'aluminium sont fréquemment utilisés dans l'industrie aéronautique et automobile en raison de leur résistance mécanique et leur légèreté [80]. Le FSW permet d'assembler facilement ces alliages entre eux.
- **Alliages de magnésium** : Contrairement aux procédés de soudage par fusion, le FSW permet de souder les alliages de magnésium sans problèmes liés à la fusion du métal [81]. De ce fait, de nombreux alliages à base de magnésium, comme ceux de la série AZ31 très utilisée [82, 83], peuvent être soudés avec succès par friction malaxage. Cette technique de soudage solide évite ainsi les défauts de solidification et les risques de fissuration ou de porosité rencontrés avec la fusion du magnésium.
- **Alliages de cuivre** : Le FSW est une excellente alternative au soudage par fusion pour les alliages de cuivre [84]. En effet, le FSW permet d'éviter la porosité qui survient fréquemment lors du soudage des alliages de cuivre par les procédés classiques avec fusion. Cet avantage est particulièrement intéressant pour souder les laitons et les bronzes, deux familles d'alliages de cuivre très utilisées dans l'industrie [85].
- **Alliages de titane** : difficiles à souder par des procédés conventionnels [86], ils se prêtent bien au FSW. Comme le TA6V très employé dans l'industrie aérospatiale [87].
- **Aciers doux et inoxydables** : malgré la difficulté liée à leur haute température de fusion, le FSW d'aciers est possible moyennant des outils adaptés [88, 89].
- **Matériaux composites** : Le FSW est également utilisé pour les matériaux composites, tels que les composites à matrice métallique (CMM) et les composites à matrice polymère (CMP) [90].
- **Matériaux spéciaux** : Le FSW peut être adapté pour d'autres matériaux spéciaux ou métaux réfractaires, en fonction des conditions de soudage spécifiques.

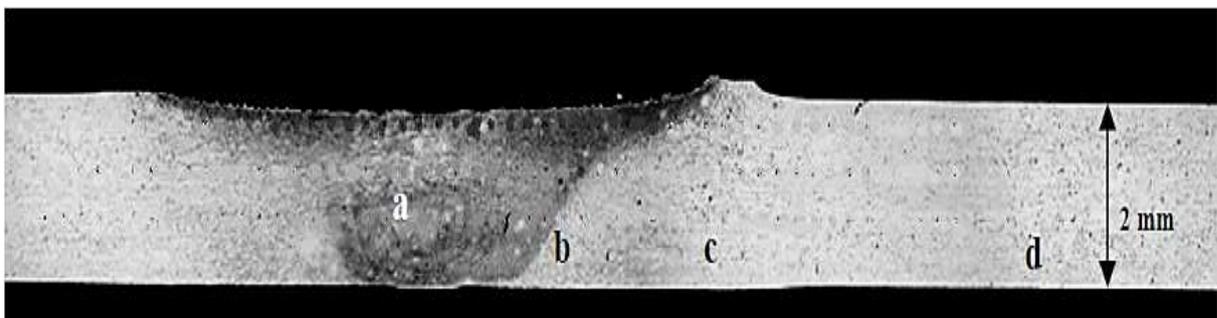
# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

## I.5.2. Possibilité d'assemblage hétérogènes

Cette technique d'assemblage permet de souder des matériaux hétérogènes, y compris des alliages d'aluminium avec d'autres métaux comme l'acier [91], le titane ou le magnésium [92], sans fusion complète du matériau [93-96].

## I.6. Structure générale des assemblages obtenus par FSW (la microstructure)

Le soudage par friction-malaxage donne lieu à un joint soudé qui présente trois zones distinctes en plus du matériau de base [97]. Ces régions sont illustrées sur la Figure I.10.



**Figure I.10.** Vue en coupe transversale du joint soudé: a) Noyau ; b) Zone affectée thermomécaniquement (ZATM) ; c) Zone affectée thermiquement (ZAT) et d) Matériau de base.

Pendant le processus de soudage par friction, le matériau constituant le joint de soudure est soumis à des variations de température, ce qui entraîne des changements de phase et des altérations de sa microstructure après refroidissement [98].

### I.6.1. La zone affectée thermiquement (ZAT ; HAZ : Heat Affected Zone)

La zone affectée thermiquement (zone c), comme son nom l'indique, subit une élévation de la température lors du soudage par FSW. Cette élévation de la température n'affecte pas la taille ni la forme des grains initialement présents [99].

Les changements observés dans cette zone sont très similaires à ceux que l'on observe dans les zones affectées thermiquement lors de procédés de soudage traditionnels [6].

Cette zone constitue généralement la zone de rupture dans la plupart des essais de traction d'un cordon FSW réalisé avec un alliage d'aluminium [100].

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

## I.6.2. La zone affectée thermomécaniquement (ZATM; TMAZ Thermo-Mechanically Affected Zone)

En ce qui concerne la zone b : Pendant son déplacement le long des deux plaques, le pion va modifier la structure des grains du matériau de base, ce qui résulte en une désorientation géométrique des grains par rapport à leur orientation initiale dans la ZATM [101].

Cette région se caractérise par les déformations plastiques provoquées par le mouvement de l'outil [6]. La limite entre le noyau soudé et la ZATM est plus nette du côté d'avance que du côté de retrait [101].

## I.6.3. Le noyau soudé (nugget)

(La zone c) subit les déformations plastiques les plus importantes et atteint des températures maximales. À ces températures, les précipités existants peuvent se dissoudre, tandis que les intermétalliques subissent un broyage et une dispersion importants en raison de la forte déformation plastique. Cette zone se situe au centre de la soudure ainsi que dans la partie supérieure de la zone d'attaque [6].

## I.7. Paramètres du soudage FSW

### I.7.1. Paramètres du procédé

Lors du soudage, plusieurs paramètres clés, notamment la vitesse de rotation de l'outil (en tr/min), la vitesse d'avance le long du joint (en mm/min), l'angle de l'outil et la pression d'application, définissent l'intensité de la chaleur transmise, le degré de mélange des matériaux et la configuration de l'écoulement.

Ces variables thermomécaniques affectent non seulement l'aspect visuel du joint, mais aussi sa microstructure et, par conséquent, ses propriétés mécaniques [97].

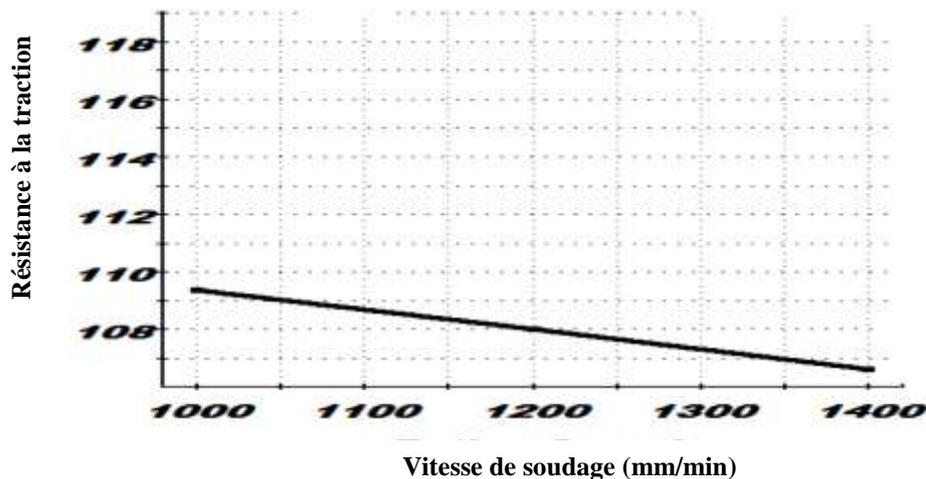
#### I.7.1.1. La vitesse de rotation de l'outil

Sélectionner la bonne vitesse de rotation est fondamental pour réussir un soudage. Trop rapide, elle peut surchauffer la pièce, causant des 'flash', et trop lente, elle peut ne pas chauffer assez les pièces, entravant le malaxage et conduisant à des bavures et des cavités dans la soudure [102]. Selon Lorrain, une augmentation de la vitesse de rotation entraîne une hausse de la température maximale et élargit les cycles thermiques ainsi que les joints [103].

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

Serier et al. 2019 ont basé leurs études sur la méthode des plans d'expériences pour prédire la qualité du cordon de soudure à la résistivité en traction. L'analyse des résultats montre que la bonne résistance à la traction est lorsque la vitesse de rotation de l'outil est à son niveau le plus bas (Figure I.11) tandis que les deux autres facteurs (la vitesse de soudage et la force axiale) provoquent une bonne résistance à la traction s'ils ont trouvé à son niveau élevé. Concluons que la force axiale est plus suggestible que la vitesse d'avancement [9].



**Figure I.11.** Effet de la vitesse de rotation sur la résistance à la traction [9].

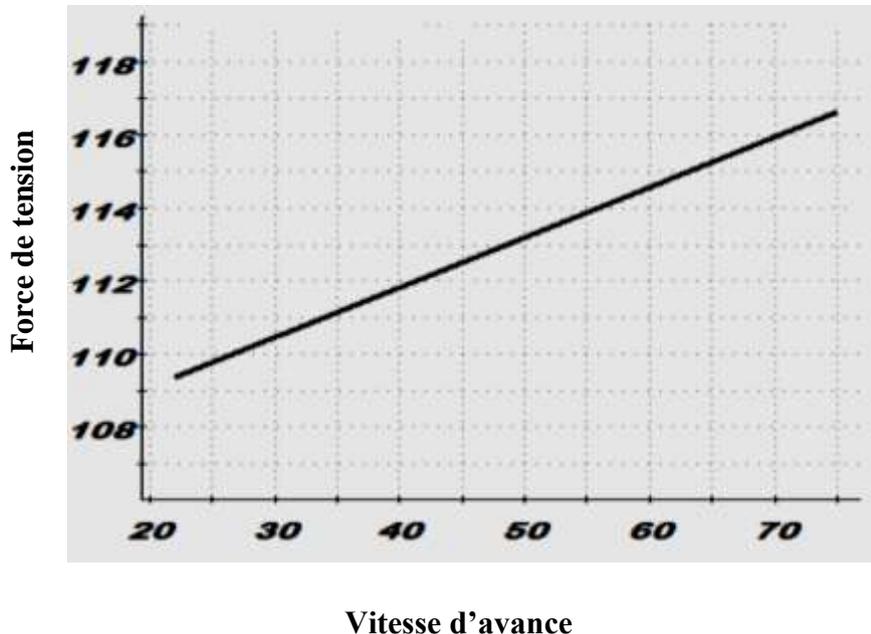
Serier et al. 2019 montrent que le retour élastique est faible si la soudure est effectuée à une vitesse de rotation de l'outil élevée [10].

### I.7.1.2. La vitesse d'avance

La sélection de la vitesse d'avance en soudage doit être adaptée aux caractéristiques du matériau de base pour éviter d'endommager l'outil. Les impacts de ce paramètre ont été largement étudiés récemment. Selon Liu et al. [104] une vitesse d'avance accrue renforce la résistance mécanique et la déformation à la rupture. Les travaux de Cavaliere et al. [105] révèlent une diminution de la taille de grain dans le cœur de la soudure avec l'augmentation de la vitesse d'avance, jusqu'à atteindre un plateau. D'autres études soulignent l'impact prépondérant de la vitesse d'avance sur la microstructure du joint par rapport à la vitesse de rotation [97, 106, 107]. Il a été constaté que la vitesse d'avance a un impact plus marqué sur la microstructure du joint que la vitesse de rotation, avec une zone affectée thermiquement réduite et une dureté accrue à des vitesses plus élevées. Cette observation est soutenue par les études de Reynolds, Tang et al. [108] qui affirment que la vitesse d'avance est un facteur déterminant dans les vitesses de chauffage et de refroidissement, affectant la durée d'exposition thermique du matériau.

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

L'angle optimal dépend de la géométrie de l'épaulement et des propriétés rhéologiques du matériau soudé [97]. Serier et al. [9] concluent que La vitesse de soudage élevée donne également une bonne qualité de joint de soudure dont le retour élastique est minimisé.



**Figure I.12.** Effet de la vitesse de soudage sur la résistance à la traction [9]

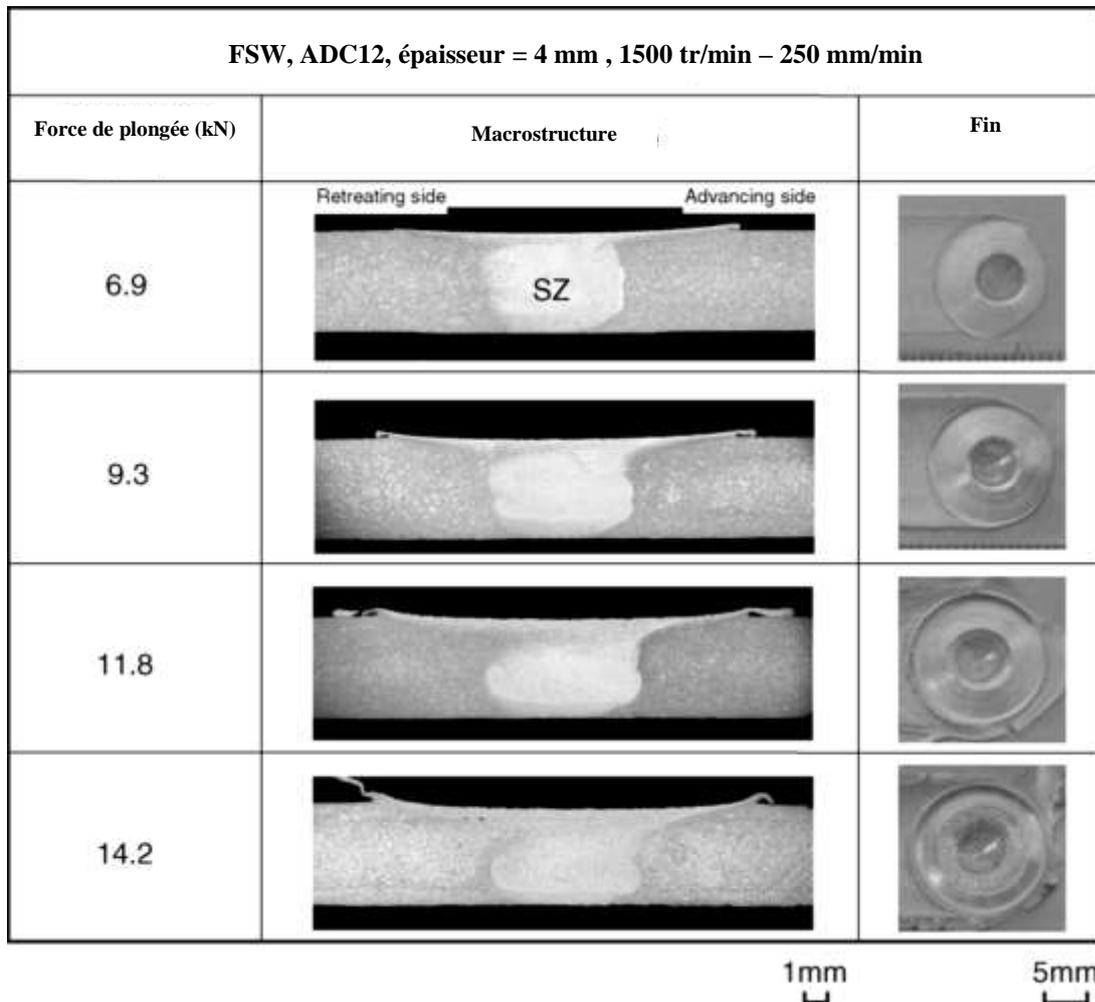
Vivekanandan et al. [109] montrent que la résistance à la traction est le maximum pour des vitesses de soudage jusqu'à 60 mm/min, est légèrement inférieure à 40 mm/min et 90 mm/min d'après les résultats des essais de résistance à la traction. D'après les résultats des essais de dureté, ils ont montré aussi que la dureté la plus élevée mesurée est de 91 HV au centre de la soudure (vitesse de soudage de 60 mm/min), faibles valeurs de dureté à d'autres vitesses de soudage sont plus à partie gauche de l'AA 6035 est une valeur inférieure que au centre, la dureté élevée sur la ligne centrale, les valeurs sont proches du matériau de base de AA6035.

### I.7.1.3. La force de forgeage

La force axiale, nécessaire pour maintenir l'outil en position verticale adéquate, joue un rôle clé, surtout lors du pilotage en force. Cette force influence directement le choix des vitesses d'avance et de rotation [102]. Lorsque les soudures sont effectuées avec un contrôle de la charge, la force verticale devient un paramètre de soudage essentiel. Yan et al. [68] ont étudié les effets d'une variation de cette force, révélant qu'il existe une plage de force qui permet de réaliser un joint sans défauts, et que les caractéristiques du joint changent peu dans cette plage de force.

## Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

Selon l'étude réalisée par Kim et al. [110] révèle que la taille de la fenêtre opératoire en soudage s'accroît avec l'intensité de la force exercée, comme l'illustre la Figure I.13.



**Figure I.13.** Effet de la force de plongée de l'outil sur la formation du joint. [110]

D'après Serier et al. [9], La force axiale est presque sans effet puisque le passage de son bas niveau à son haut niveau ne donne pas un changement considérable sur le retour élastique.

### I.7.1.4. L'angle d'inclinaison de l'outil

L'ajustement de l'angle de l'outil, généralement compris entre  $0^\circ$  et  $5^\circ$ , est crucial pour optimiser la distribution de la matière autour du pion de soudage. Il joue également un rôle clé dans la correction de l'angle de l'outil, qui peut être altéré par la résistance des pièces en cours de soudage.

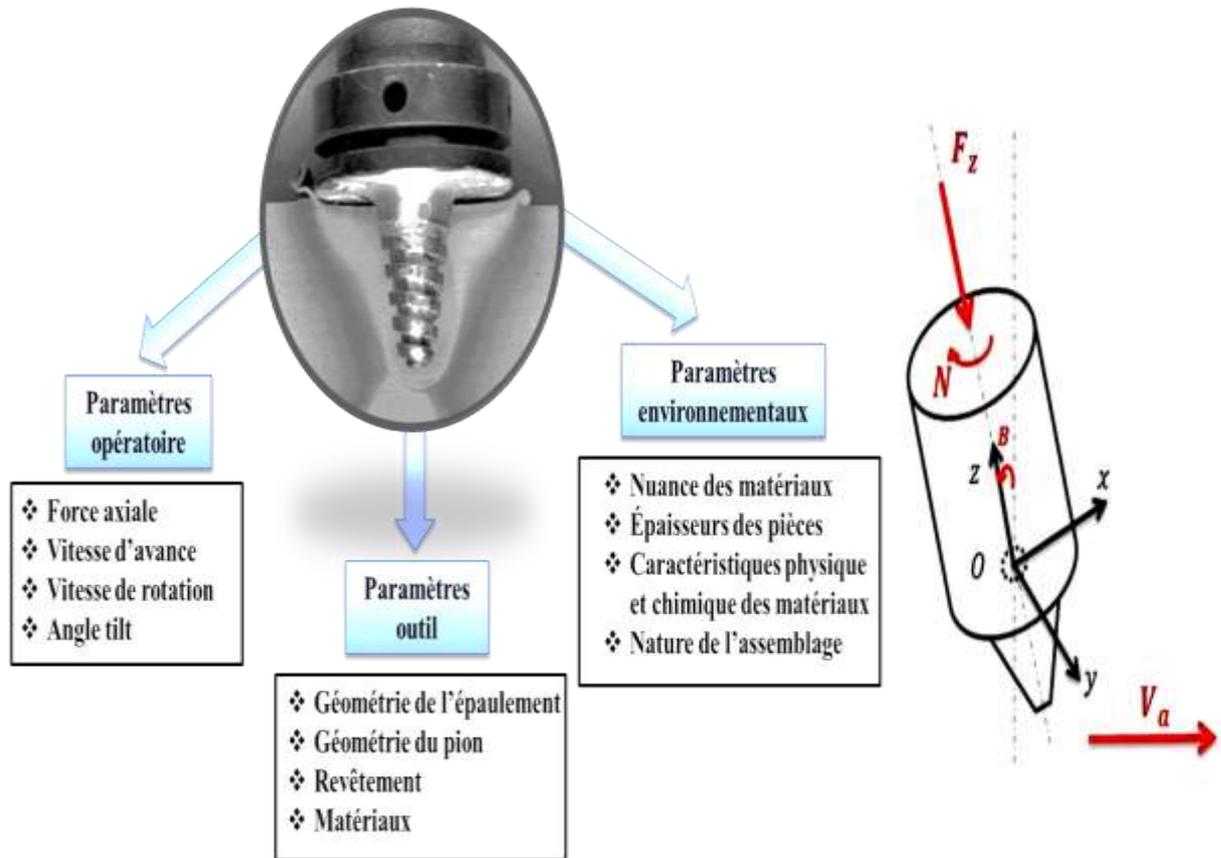


Figure I.14. Les paramètres du procédé FSW

## I.7.2. Paramètres outils

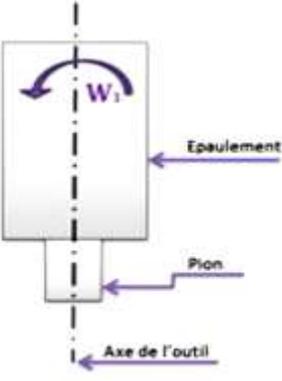
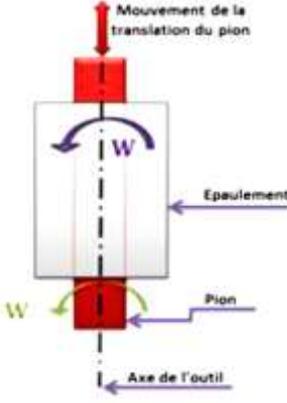
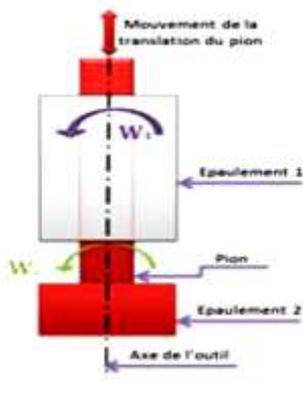


Figure I.15. Les technologies d'outils existants (a) Outil conventionnel, (b) Outil à pion rétractable et (c) Outil à deux épaulements et un pion ajustable verticalement.

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

Particularité de ses technologies

Tableau I.1. Les technologies d'outils existants

Outil conventionnel	Outil à pion rétractable	Outil à deux épaulements et un pion ajustable
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 pion solidaire de l'épaulement</li> <li>• 1 épaulement</li> <li>• 1 axe outil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 pion ajustable</li> <li>• 1 épaulement</li> <li>• 2 axes outils</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 pion ajustable</li> <li>• 2 épaulements</li> <li>• 2 axes outils</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• C'est l'outil le plus utilisé</li> <li>• Nécessite juste l'accès à la surface supérieure</li> <li>• Nécessite une enclume à l'envers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soudage des pièces avec épaisseurs variables</li> <li>• Nécessite juste l'accès à la surface supérieure</li> <li>• Pas de trou à l'extrémité : car avec cet outil, le pion rentre progressivement dans l'épaulement supérieur à la fin du soudage</li> <li>• Contrôle du pion et de l'épaulement de manière distincte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'enclume</li> <li>• Limite les efforts créés par la machine utilisée pour effectuer FSW</li> <li>• Nécessite l'accès aux deux surfaces des pièces à souder</li> <li>• Contrôle du pion et de l'épaulement de manière distincte</li> </ul>

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

Pour synthétiser, la configuration de l'outil est essentielle dans la régulation du mouvement du matériau pendant le processus de soudage, et l'influence des forces axiales sur l'outil est également significative. D'après de Backer, un pion fileté requiert une plus grande force axiale en soudage par friction-agitation (FSW) qu'un pion lisse [111]. Les aspects clés à prendre en compte sont :

- Conception du pion.
  - Forme de l'épaulement.
  - Types de matériaux utilisés.
- a. Paramètres associés à l'environnement du procédé**
- Épaisseur des pièces à assembler.
  - Variations de température durant le soudage.
  - Nuance des matériaux employés.
  - Nature de l'assemblage (utilisation de matériaux identiques ou différents).
  - Propriétés chimiques et physiques des matériaux, comme leur conductivité et capacité thermiques.

La sélection appropriée des paramètres de soudage, en fonction des matériaux utilisés, de l'épaisseur des pièces et de la géométrie de l'outil, est cruciale. Ces choix affectent directement l'apport énergétique, la circulation de la matière, la qualité du cordon, ainsi que les propriétés mécaniques et les efforts mécaniques générés dans l'assemblage [31].

Des défauts tels que porosités, criques de refroidissement, et bavures peuvent résulter d'un mauvais réglage de ces paramètres. Il existe de nombreuses études visant à déterminer la relation entre ces paramètres et leur impact sur les qualités mécanique et métallurgique du joint [6].

## **I.8. Avantage et inconvénients du FSW**

### **I.8.1. Avantages**

#### **I.8.1.1. Avantages liés au procédé**

- Large Capacité à souder une large gamme d'épaisseurs de matériau.
- La préparation simple des surfaces par usinage mécanique, éliminant le besoin de décapage chimique pour les alliages légers.

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

- Réalisation des soudures en une seule passe sur des épaisseurs standard, ou en deux passes opposées pour les épaisseurs importantes.
- La possibilité de joindre des matériaux différents, offrant une grande flexibilité.
- L'absence de travaux de finition requis après le soudage, économisant du temps et des ressources.
- Caractéristique de ne pas nécessiter d'apport de matière additionnelle pour la soudure.
- L'autonomie du procédé en tant que source d'énergie.
- Flexibilité de soudage dans diverses orientations.

## **I.8.1.2. Avantages liés à la soudure par FSW**

- Capacité à souder un large éventail de matériaux, y compris ceux qui sont difficiles à souder par des méthodes classiques.
- Possibilité de réaliser des soudures homogènes ou hétérogènes sur des alliages complexes.
- Procédé de soudage à l'état solide, évitant les défauts associés à la solidification tels que la porosité ou la fissuration à chaud.
- Joints soudés de haute qualité avec des caractéristiques mécaniques souvent supérieures à celles obtenues par les techniques de soudage par fusion traditionnelles.
- Excellentes propriétés mécaniques des joints, assurant solidité et durabilité.
- Minimisation des contraintes résiduelles, réduisant le risque de déformation ou d'endommagement post-soudage.
- Faible distorsion des pièces soudées, garantissant une meilleure intégrité structurelle.

## **I.8.1.3. Avantages liés à l'équipement utilisé**

- Facilité d'automatisation du procédé grâce à un contrôle précis par commande numérique, augmentant l'efficacité et la reproductibilité.
- Conception simple de l'équipement électromécanique, similaire à une machine-outil standard, ce qui simplifie la maintenance et l'opération.

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

- Absence de nécessité de protection thermique supplémentaire, réduisant ainsi les coûts et la complexité opérationnelle.
- Consommables limités principalement à l'outil de soudage lui-même et à l'énergie électrique, rendant le processus plus économique.
- Possibilité de contrôler et d'ajuster les paramètres en temps réel pendant le soudage, assurant une qualité constante et une adaptabilité aux conditions de soudage.

## I.8.2. Inconvénient

Le FSW, malgré ses avantages, comporte plusieurs contraintes techniques. Parmi celles-ci, on compte la nécessité d'exercer des forces verticales importantes pour former le joint, l'utilisation d'installations volumineuses, la nécessité de supports pour contrer les forces latérales, le bridage strict des pièces, la formation de cratères en fin de soudure, et des vitesses de soudage modérées.

Le procédé FSW est susceptible au défaut de racine, un problème lié à une pénétration inadéquate de l'outil de soudage. Ce défaut survient lorsqu'il y a une pénétration insuffisante par l'outil de soudage, ce qui équivaut à un manque d'adhésion à la racine du joint. Sa détection pendant le processus de soudage est ardue, et les inspections destructives sont souvent les seules méthodes fiables pour identifier ce défaut [34].

## I.9. Les domaines d'applications

### I.9.1. Domaine automobile

En 2013, Mercedes a adopté le procédé FSW pour assembler les pièces du plancher de son modèle SL-Class, Mazda, quant à elle, a utilisé cette technique pour souder des parties de la suspension, ainsi que les capots et les portes de ses voitures, ce qui a conduit à une réduction significative des coûts d'équipement, de l'ordre de 40% [68]. La voiture R8 d'Audi est un exemple de l'utilisation du soudage par friction-malaxage, où des feuilles d'aluminium de variées épaisseurs ont été soudées ensemble. Honda a également mis en pratique le procédé FSW pour joindre des pièces en acier et en aluminium, deux matériaux différents. Cette technique a aussi été employée dans le soudage de fonds bombés pour des camions-citernes [68]. Analyse approfondie du soudage FSW sous deux aspects : expérimental et numérique.

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

L'étude se concentre sur l'examen microstructural et la modélisation des interactions thermomécaniques transitoires entre l'outil de soudage et le matériau [67].

## I.9.2. Domaine ferroviaire

Des constructeurs ferroviaires européens ont appliqué cette technique pour les toits des tramways à Munich, et au Japon, il a été utilisé dans la fabrication des trains Hitachi [68].

## I.9.3. Domaine aéronautique

Dans l'industrie aéronautique, Boeing a utilisé le FSW pour l'assemblage de divers éléments, y compris le soudage de raidisseurs, et a également été utilisé pour la construction des panneaux de l'Eclipse 500 [68]. Le constructeur aéronautique Airbus a innové en adoptant le soudage par friction-malaxage pour ses grands avions civils, une première dans l'industrie. Cette méthode de soudage est considérée comme une alternative supérieure au rivetage traditionnel, grâce à ses vastes possibilités d'application [112].

## I.9.4. Domaine spatial

Dans la fabrication des fusées Boeing, des méthodes de soudage circconférentiel et longitudinal ont été appliquées pour les réservoirs d'oxygène liquide. Cette technique a également été mise en œuvre pour le soudage des panneaux incurvés du réservoir d'hydrogène liquide de la constellation Ares I de la NASA [68].

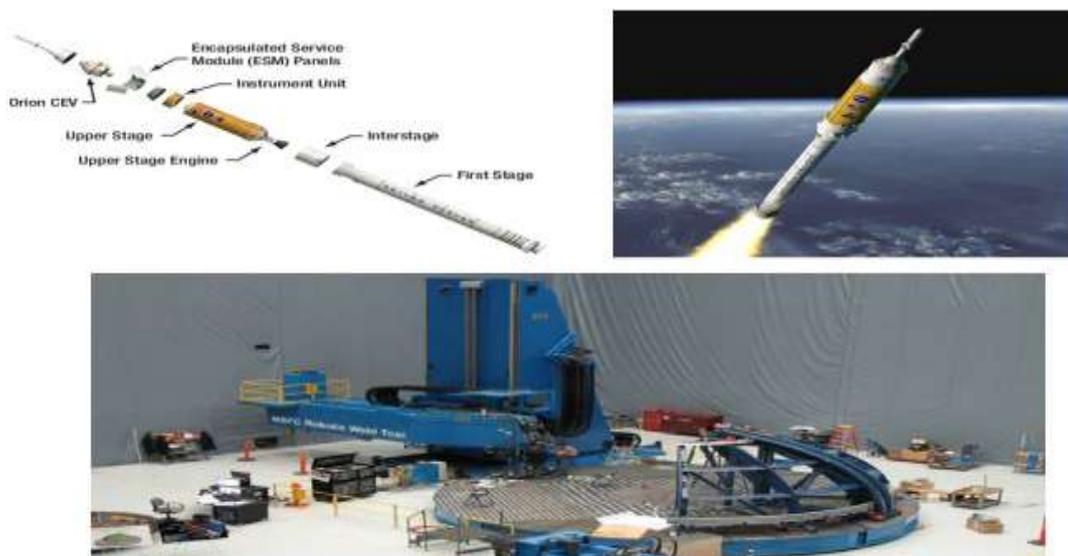


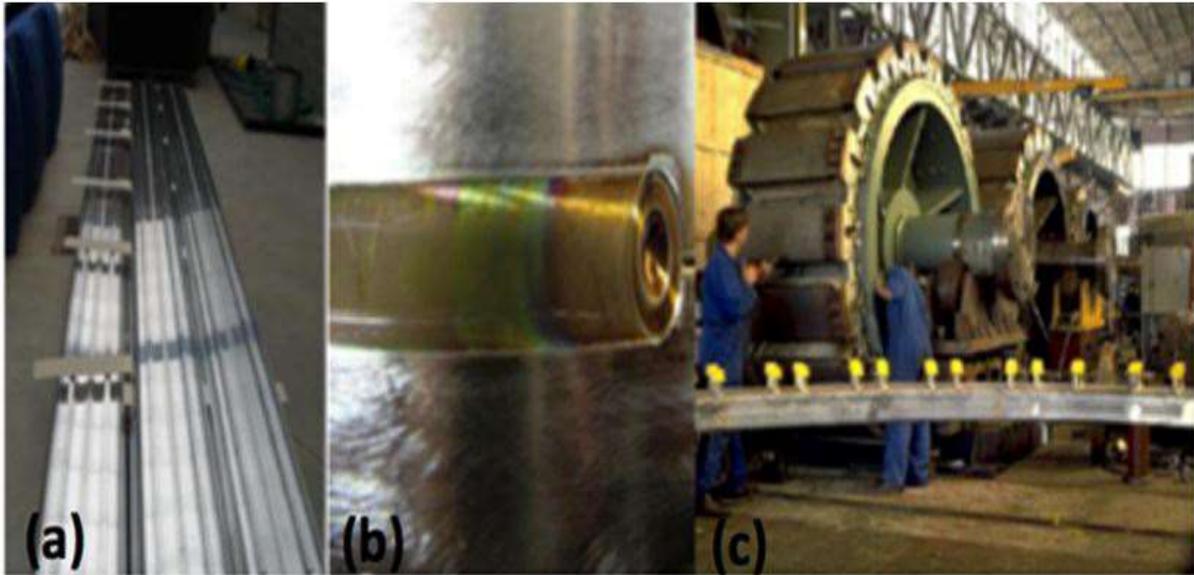
Figure I.16. Ares I

# Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

---

## I.9.5. Autres domaines d'application

Le soudage trouve son application dans l'assemblage de supports de lumières (Figure I.25. (a)), la jonction de tôles en CU-OF dans le domaine du génie électrique (Figure I.25. (b)), ainsi que la construction d'éléments générateurs, illustrée en Figure I.25. (c) [68].



**Figure I.17.** (a) : Des supports de lumières, (b) : Des tôles en CU-OF, (c) Des éléments de générations

## I.10. Conclusion

Au début de cette thèse, l'accent a été mis sur une variété de sujets, étudiés tant dans la littérature académique et les expériences pratiques, qui contribuent à mieux comprendre les phénomènes physiques associés au soudage par friction-malaxage (FSW).

Nous avons mis en exergue les complexités liées à l'adaptation de ces modèles pour la modélisation du procédé de soudage FSW.

Notre étude de la littérature indique que la déformation tend à se focaliser autour des zones affectées thermomécaniquement (ZATM) dans la plupart des situations.

# Chapitre II

# Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

## II.1. Introduction

Dans le secteur industriel, le comportement des produits est une combinaison complexe de plusieurs caractéristiques interdépendantes. Pour anticiper ce comportement, une modélisation du produit et des phénomènes associés est réalisée, suivie de simulations. La fiabilité des résultats de ces simulations est directement liée à la précision des modèles utilisés [113, 114].

La méthode des plans d'expérience est conçue pour obtenir le maximum d'informations de manière économique. Elle permet de déterminer rationnellement le nombre d'essais nécessaires, réduisant ainsi les informations superflues. Elle offre une approche plus économique et simplifiée, et permet une optimisation totale des conditions expérimentales. Elle aide non seulement à améliorer la qualité des produits et processus, mais aussi à réduire les délais et les coûts de développement.

Les plans d'expériences, qui font partie de cette méthodologie, sont Utilisés dans le cadre de la recherche-développement en milieu industriel, les plans d'expériences sont répandus à travers de nombreux secteurs industriels [115].

Parmi les secteurs d'application des plans d'expériences, on trouve:

- Industries Chimiques: Utilisés pour optimiser les processus chimiques, développer de nouveaux composés et améliorer la qualité des produits.
- Industries Pétrochimiques: Employés pour améliorer les processus de raffinage, de production de polymères, et d'autres procédés chimiques liés au pétrole.
- Industrie Pharmaceutique: Utilisés pour la formulation de médicaments, l'optimisation des processus de fabrication, et les études de stabilité.
- Industries Mécaniques: Appliqués dans la conception et l'amélioration de machines, d'équipements, et dans l'optimisation des processus de fabrication.
- Industrie Automobile: Employés pour le design de véhicules, l'amélioration des performances et de la sécurité, ainsi que dans l'optimisation des processus de production.
- Industrie Métallurgique: Utilisés pour améliorer les processus de fusion, de formage, et pour le développement de nouveaux alliages.
- Secteur Agroalimentaire: Appliqués dans le développement de nouveaux produits, l'optimisation des processus de production et l'assurance qualité.

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

- Industrie Aérospatiale: Utilisés pour la conception et les tests de composants aérospatiaux, la réduction des coûts de production et l'amélioration de la fiabilité.
- Électronique et Semi-conducteurs: Appliqués dans la conception de circuits, l'optimisation de la fabrication des semi-conducteurs et la gestion de la qualité.
- Biotechnologie: Employés pour le développement de processus biotechnologiques, l'optimisation de la production de biomolécules, et dans la recherche médicale.

Le but est de sélectionner et de planifier les tests de sorte à identifier économiquement les effets des différents paramètres sur le produit, Cette approche repose sur des techniques statistiques basées principalement sur des principes mathématiques simples.

La méthodologie de surface de réponse, établie dans les années 1940, fusionne des techniques de plan d'expérience, de statistique, de modélisation empirique et d'optimisation mathématique. Son but est d'améliorer la performance des processus et produits, et elle s'avère être un outil efficace pour l'évaluation des risques et la requalification des installations pétrolières.

Ici, les notions mathématiques cruciales pour une compréhension approfondie de la méthode des plans d'expérience sont présentées en détail.

La méthode des plans d'expériences s'ancre dans la compréhension de deux concepts clés : la notion d'espace expérimental et la modélisation mathématique des paramètres étudiés [113].

### II.2. Plans d'expériences

#### II.2.1. Définition

La méthode des plans d'expériences (MPE), également appelée Design of Experiment (D.O.E.), est applicable à de nombreux domaines et industries. Elle s'applique à une vaste gamme de disciplines et industries, idéale pour examiner les liens entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables  $x_i$ , dans une perspective d'optimisation. Des outils logiciels comme Matlab et MiniTab sont fréquemment utilisés pour gérer ces analyses [6].

Cette approche vise à identifier une connexion entre deux sortes de grandeurs :

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### a) La réponse

Souvent désignée sous l'appellation de Variable Dépendante ou VD, cette grandeur physique à étudier est une propriété mesurable d'un produit ou d'un processus. Sa variation, analysée en fonction des changements des autres facteurs, pose un défi dans le choix des réponses. Ce choix complexe s'écarte de la simple théorie des Plans d'Expériences. Il est essentiel d'effectuer une analyse rigoureuse des phénomènes, enjeux, objectifs et contraintes avant de pouvoir identifier les réponses les plus pertinentes [116].

### b) Les facteurs

Les Variables Indépendantes, également connues sous l'acronyme VI, ces grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur sont supposées affecter les variations de la réponse, peuvent être qualitatives (basées sur des catégories ou des qualités) ou quantitatives (basées sur des quantités mesurables). Elles peuvent également être continues (pouvant prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle) ou discontinues (limitées à certaines valeurs distinctes). Enfin, elles peuvent être contrôlables (directement manipulables par l'expérimentateur) ou non contrôlables (non manipulables mais pertinentes pour l'étude) [116-118].

Dans le cadre d'une étude expérimentale, un facteur présente une variation définie entre deux niveaux:

- Le niveau bas, symbolisé par -1, qui constitue la borne inférieure,
- Le niveau haut, représenté par +1, qui est la borne supérieure.

### c) Interaction

Quand l'effet du facteur A sur la réponse est influencé par la valeur du facteur B, on dit qu'il y a une interaction entre A et B. L'effet de cette interaction, noté AB, représente la combinaison des effets de A et B. Lorsque n facteurs sont impliqués dans une interaction, elle est considérée comme d'ordre n-1.

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### II.2.2. Les étapes de la démarche des plans d'expériences

Les plans d'expériences suivent une démarche méthodique comprenant plusieurs étapes clés suivantes :

- **Définition des Objectifs** : Clarifier ce que l'expérience vise à découvrir ou à prouver. Cela implique de comprendre la question de recherche, l'hypothèse ou le problème à résoudre.
- **Sélection des Facteurs, Niveaux et Réponses** : Identifier les variables à étudier (facteurs) et à quelles valeurs (niveaux) elles seront testées. Déterminer également la ou les réponses (variables dépendantes) qui seront mesurées.
- **Choix du Type de Plan d'Expérience** : Selon les objectifs et les ressources disponibles, choisir un plan d'expérience approprié (comme un plan factoriel complet, fractionné, ou séquentiel).
- **Conception de l'Expérience** : Élaborer le schéma expérimental en décidant de l'ordre et de la manière dont les facteurs seront combinés et testés.
- **Collecte de Données** : Mener l'expérience en suivant rigoureusement le plan et enregistrer les données résultantes.
- **Analyse des Données** : Utiliser des méthodes statistiques pour analyser les données recueillies et interpréter les résultats.
- **Interprétation des Résultats** : Tirer des conclusions basées sur l'analyse des données et déterminer si elles soutiennent l'hypothèse ou répondent à la question de recherche.
- **Rapport et Recommandations** : Préparer un rapport détaillé présentant la méthodologie, les résultats, les interprétations et les recommandations basées sur l'étude.

### II.2.3. Les avantages

Parmi les bénéfices clés des plans d'expérience, on compte :

- La limitation du nombre d'essais requis, entraînant une diminution des coûts.
- L'identification et une meilleure compréhension des interactions entre les paramètres étudiés.
- L'identification des conditions les plus favorables.
- La détection des meilleures conditions pour réaliser les expériences.

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

- La capacité de modéliser et d'optimiser les résultats.

Dans l'ensemble, un plan d'expérience cherche à analyser et à chiffrer l'influence existant entre deux types de variables [119]:

- Le facteur (paramètres d'entrée du processus) : Il peut être classé en variable contrôlable ou non contrôlable, ou même en états, et il s'agit sur le système étudié.
- La réponse (paramètres de sorties de l'expérience): Il s'agit de grandeurs mesurées ou observées dans le but d'évaluer les effets des facteurs sur le système.

PEX (Plans d'Expériences) désigne une méthodologie mathématique adoptée pour la conception et la réalisation efficaces d'études scientifiques qui altèrent en même temps les variables d'entrée (X), désignées sous le nom de facteurs, dans le but de mettre en lumière leurs conséquences sur une variable de sortie (ou plusieurs) (Y), connue sous le nom de réponse.

### II.3. La méthode de surface de réponse (MSR)

#### II.3.1. Définition

La méthodologie de surface de réponse (MSR) comprend diverses techniques statistiques et mathématiques qui sont particulièrement utiles dans le cadre du développement, Elle est particulièrement pertinente lorsqu'il existe plusieurs variables d'entrée qui ont un impact sur les caractéristiques de performance et de qualité d'un produit ou d'un processus. Parfois, la MSR est également désignée sous les noms de "modèle de régression polynomiale" ou de "modèle polynomial". [120].

Cette approche propose des méthodes mathématiques et statistiques permettant d'analyser les liens entre une ou plusieurs variables de réponse (VD) et un ensemble de facteurs (VI).

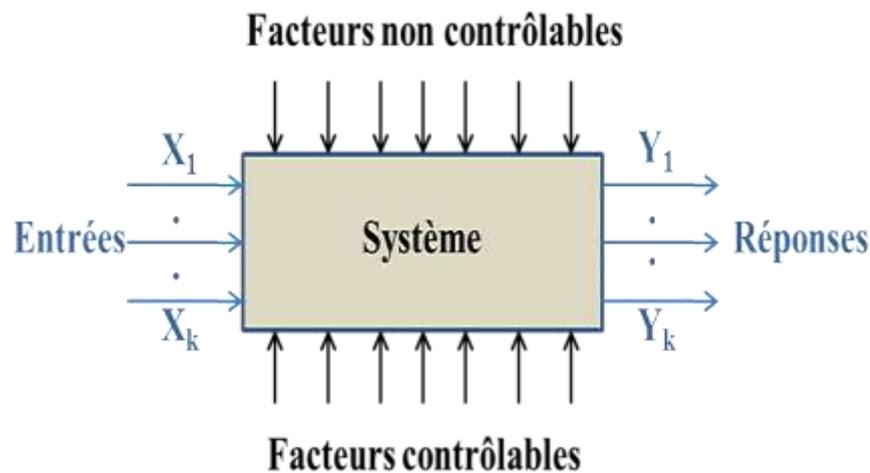
Pour optimiser une réponse ou trouver un compromis entre plusieurs réponses, il est essentiel de déterminer un jeu de réglages des facteurs qui permettra de satisfaire de manière optimale aux exigences formulées en termes de réponse. Pour élaborer un modèle de surface de réponse, il est nécessaire d'analyser les fluctuations des résultats des essais obtenus grâce à un plan d'expérience [113].

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

La MSR englobe les éléments suivants :

- Une approche expérimentale visant à explorer l'espace des paramètres du processus,
- L'utilisation de modèles empiriques pour établir une relation approximative entre le rendement et les variables du processus,
- Des techniques d'optimisation pour trouver les valeurs des variables du processus qui conduisent à des résultats souhaitables de la réponse [118].



**Figure II.1.** Schéma simplifié de l'environnement d'un système donné

On peut classifier les facteurs de la manière suivante :

- Facteurs Contrôlables: Ceux qui sont sous l'influence directe du technicien, tels que la pression, la température, ou le choix du matériau.
- Facteurs Non Contrôlables: Ceux qui évoluent indépendamment des décisions du technicien, comme les conditions climatiques ou l'environnement d'utilisation.
- Facteurs d'Entrée à Analyser: Ceux dont on souhaite évaluer l'impact, comme la matière première, la vitesse d'agitation, la température ou le rendement.

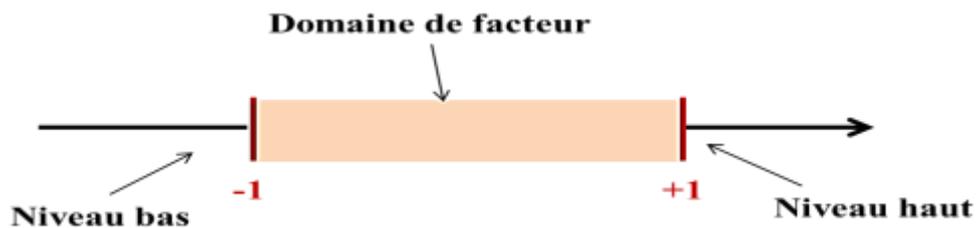
### II.4. Notion d'espace expérimental

Dans le cadre d'une étude, un expérimentateur mesure systématiquement une certaine grandeur, dénommée "réponse", lors de chaque essai. Cette "réponse" est l'élément central de l'étude et son évaluation dépend de plusieurs éléments, ici appelés "facteurs" plutôt que variables. La variation de la réponse est donc fonction d'un ou de plusieurs de ces facteurs. Pour

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

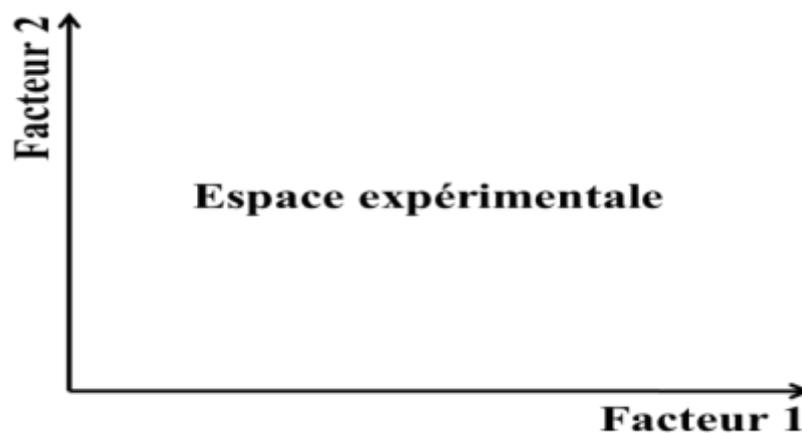
visualiser l'impact d'un facteur spécifique, on peut le représenter sur un axe gradué, comme indiqué dans la Figure II.2. La spécification d'une valeur pour un facteur dans un essai est désignée comme le "niveau" de ce facteur. En examinant l'effet d'un facteur, il est courant de restreindre ses variations à une plage définie, avec un niveau bas et un niveau haut comme limites [113].



**Figure II.2.** Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs

Pour un facteur donné dans une expérience, l'intervalle de toutes ses valeurs potentielles, délimité par le niveau bas ( $-1$ ) et le niveau haut ( $+1$ ), est connu comme son domaine de variation. Ce domaine englobe toutes les valeurs possibles du facteur dans l'expérience.

Si un second facteur est pris en compte dans une étude, il est également représenté par un axe gradué, orthogonal au premier. On assigne à ce second facteur des niveaux haut et bas, délimitant son domaine de variation. Cette disposition crée un repère cartésien, aboutissant à un espace euclidien à deux dimensions, connu sous le nom d'espace expérimental, illustré dans la Figure II.3.



**Figure II.3.** L'espace expérimental

## **Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience**

---

### **II.5. Notion de surface de réponse**

Dans le contexte expérimental, les niveaux  $x_i$  désignent les coordonnées d'un point donné, tandis que la valeur  $y$  est la mesure de la réponse à ce point. Pour visualiser cette relation, un axe supplémentaire, perpendiculaire à l'espace expérimental, est introduit et est spécifiquement consacré à la réponse, formant ainsi une structure tridimensionnelle pour l'analyse des données [121].

Pour représenter de manière géométrique à la fois le plan d'expériences et les réponses obtenues, il est essentiel d'utiliser un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental original. Dans le cas d'un plan comportant deux facteurs, on a besoin d'un espace tridimensionnel : une dimension est dédiée à la réponse, tandis que les deux autres représentent chacun des facteurs [113].

### **II.6. Objectif de modélisation**

L'utilisation de ces modèles offre une multitude de possibilités et peut atteindre divers objectifs selon les besoins spécifiques:

#### **II.6.1. Objectif de prédiction**

Grâce au modèle mathématique établi, il est possible de prédire la réponse pour un point donné dans les limites des domaines expérimentaux. Ces réponses, cumulées sur l'ensemble du domaine d'étude, créent une surface appelée "surface de réponse", détaillée dans la Figure II.4 [117].

La détermination optimale du nombre et de la localisation des points d'expérience constitue un enjeu majeur dans l'élaboration des plans d'expériences. L'idée est d'atteindre une précision élevée sur la surface de réponse, sans pour autant multiplier excessivement les expériences.

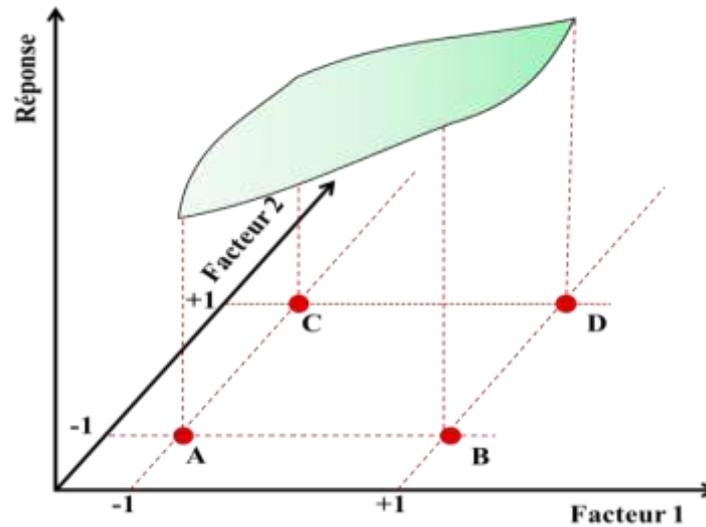


Figure II.4. La surface de réponse.

### II.6.2. Objectif d'optimisation

L'optimisation des processus vise à déterminer les meilleures valeurs pour les entrées afin d'obtenir les sorties désirées. Les objectifs courants de cette optimisation comprennent l'augmentation du rendement du processus, la réduction du temps de traitement pour la production, ou le respect des spécifications cibles du produit (comme illustré dans la Figure II.5).

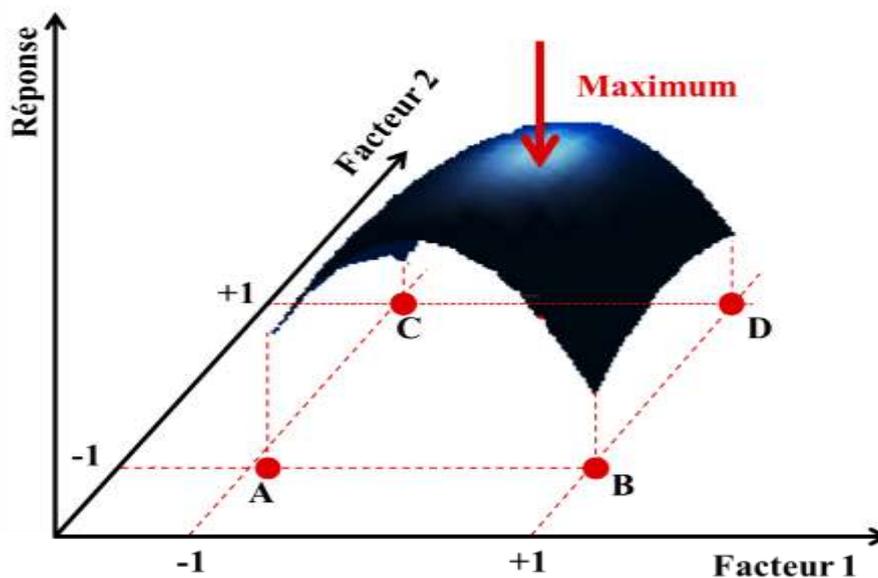


Figure II.5. L'optimisation de la réponse

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### II.7. Principes de Base de la modélisation mathématique

Initialement, on sélectionne une fonction mathématique pour modéliser la relation entre la réponse et les facteurs. Pour simplifier cette relation, on utilise un développement en série de Taylor-Mac Laurin, où les dérivées sont considérées constantes. Ceci aboutit à une expression sous forme de polynôme, dont le degré varie selon la complexité souhaitée :

$$y_i = a_0 + \sum x_i a_i + \sum x_i x_j a_{ij} + \dots + \sum x_i^2 a_{ii} + a_{jj\dots z} x_i x_j \dots \dots x_z \quad (1)$$

Où :

- La grandeur "  $y$  ", mesurée avec précision lors des expériences, est la réponse recherchée
- Les niveaux "  $x_i$  " sont les valeurs attribuées aux facteurs par l'expérimentateur pour chaque essai, considérées comme exactes sans erreur selon l'hypothèse classique en régression.
- Les coefficients "  $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  " du modèle mathématique choisi doivent être déterminés à partir des données expérimentales, car leur valeur n'étant pas connue à l'avance.

Le principal intérêt de l'utilisation d'un polynôme pour modéliser la réponse est qu'il permet de déduire toutes les réponses possibles dans le domaine d'étude, évitant ainsi la nécessité de conduire des expériences réelles.

Ce modèle est souvent désigné comme un "modèle postulé" ou "modèle a priori".

Pour simplifier, les deux types d'écarts - manque d'ajustement et erreur expérimentale - sont souvent rassemblés en une seule variable, désignée par "e". Ainsi, le modèle utilisé par l'expérimentateur prend la forme suivante :

$$y_i = a_0 + \sum x_i a_i + \sum x_i x_j a_{ij} + \dots + \sum x_i^2 a_{ii} + a_{jj\dots z} x_i x_j \dots \dots x_z + e \quad (2)$$

#### II.7.1. Les aspects clés de la régression linéaire multiple dans le contexte de la modélisation

La régression linéaire multiple sert à analyser les données quantitatives, visant spécifiquement à identifier comment une variable définie comme la réponse ( $y$ ) est associée à plusieurs variables explicatives  $x_1, x_2, \dots, x_k$ .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (3)$$

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### II.7.2. Variables codées

L'utilisation de variables centrées et codées dans la plage de -1 à +1 standardise le domaine de variation pour tous les facteurs, rendant possible la généralisation de la théorie des plans d'expériences. L'usage de variables codées assure un domaine de variation standardisé [-1, +1] pour chaque facteur, facilitant ainsi la comparaison de leurs effets. Dans le modèle final, ce sont ces variables codées, sans dimensions et comprises entre -1 et +1, qui sont intégrées :

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

Où :

- $x_i$  est la valeur codée
- $u_i$  est la valeur réelle du facteur
- $u_{\min i}$  est la valeur minimale du facteur
- $u_{\max i}$  est la valeur maximale du facteur

### II.8. Plans factoriels

Les plans factoriels permettent l'étude conjointe de divers facteurs, à la fois qualitatifs et quantitatifs. L'objectif est d'identifier les facteurs ayant un impact notable sur la réponse et d'examiner l'importance des interactions entre eux selon le type de plan d'expériences adopté [85].

#### II.8.1. Plans factoriels complets à deux niveaux

Dans ce type de plans factoriels, chaque facteur est évalué à deux niveaux distincts, -1 et +1. Cette limitation à deux niveaux, lorsqu'elle est appliquée dans une expérience factorielle complète, réduit le nombre d'essais nécessaires et offre une étude complète de tous les facteurs et de leurs interactions. Des exemples de ces plans pour deux et trois facteurs sont représentés dans la Figure II.6 [85].

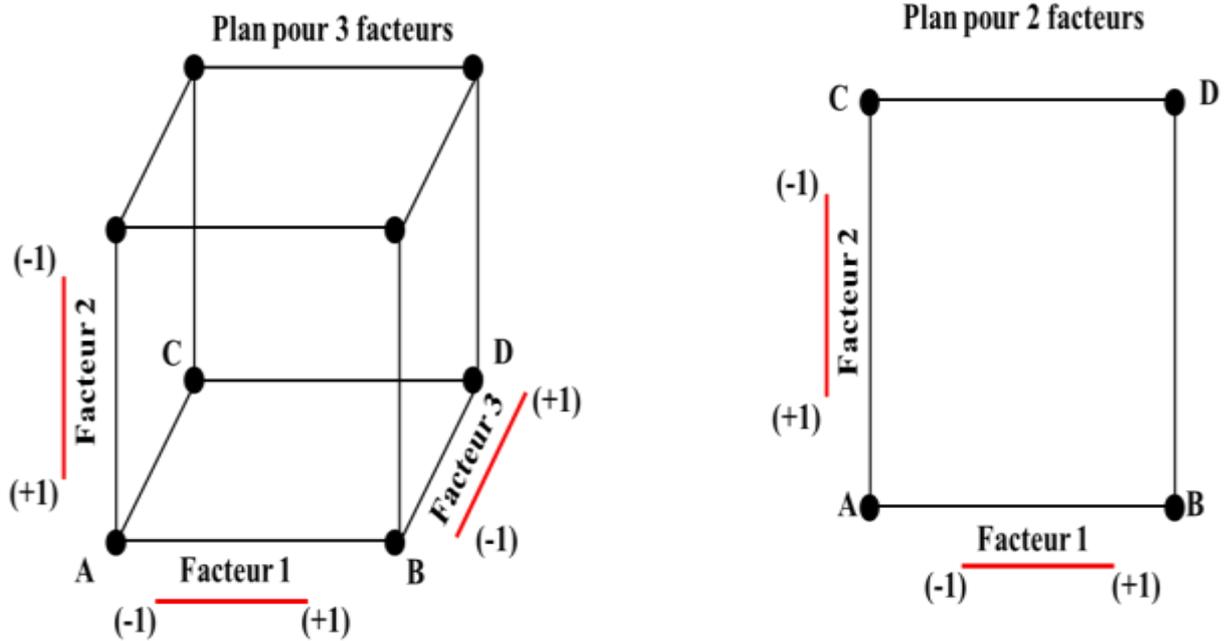


Figure II.6. Plans factoriels complets  $2^2$  et  $2^3$

### II.8.1.1. Matrice d'expériences

Chaque matrice d'expériences détaille les combinaisons des niveaux haut et bas de chaque facteur, codés en +1 et -1. Pour deux facteurs, cela donne lieu à quatre essais [85]. Un plan pour lequel nous avons k facteurs est appelé un plan  $2^k$ . Le nombre d'expériences à réaliser sera donc  $2^k$  expériences. Ce nombre devient rapidement très important.

Ces matrices se conçoivent en utilisant Matlab, en alternant des groupes de  $2^{c-1}$  en -1 et  $2^{c-1}$  en +1 dans chaque colonne, comme exposé dans les Tableaux II.1 et II.2 pour des plans factoriels complets  $2^2$  et  $2^3$ .

Tableau II.1. Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets  $2^2$

Exp	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

**Tableau II.2.** Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets  $2^3$

Exp	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
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

Le modèle mathématique proposé adopte une approche de premier degré pour chaque facteur, indiquant une relation linéaire. L'équation II.5 représente le modèle postulé sans interactions.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + e \quad (\text{II. 5})$$

Où :

- $a_0$  représente l'effet théorique.
- $a_i$  représentent les effets principaux des différents facteurs.

Le modèle avec interactions d'ordre 2 évalue les effets des interactions entre deux facteurs. Ces effets sont mesurés et exprimés à travers les coefficients  $I_{ij}$  dans l'équation II.6.

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

L'équation II.7 décrit le modèle complet qui inclut k facteurs ainsi que toutes leurs interactions mutuelles.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum_{i<j} \sum_{i<j}^k I_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i<j<\dots<=k} \sum_{i<j<\dots<=k}^k I_{ij,\dots,k} x_i x_j \dots \dots x_k + e \quad (\text{II. 7})$$

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### II.8.1.2. Effets globaux et effets moyens

Considérons la matrice d'expériences, y compris les réponses ( $y_i$ ), présentée dans le Tableau II.3, correspondant à un plan factoriel complet  $2^2$  pour deux facteurs, désignés  $x_1$  et  $x_2$ .

**Tableau II.3.** Matrice d'expériences avec réponses pour un plan factoriel complet  $2^2$

Exp	$x_1$	$x_2$	Réponse $y_i$
1	-1	-1	$y_1$
2	+1	-1	$y_2$
3	-1	+1	$y_3$
4	+1	+1	$y_4$

Il est possible de quantifier à la fois les effets principaux des facteurs et leurs interactions :

#### a) Les effets moyens d'un facteur

Pour calculer les effets moyens d'un facteur, on prend les moyennes des réponses pour les niveaux -1 et +1. . Ces effets pour le facteur  $x_1$  sont représentés par les équations II.8 et II.9.

$$a_1^- = \frac{Y_1 + Y_3}{2} \quad (\text{II. 8})$$

$$a_1^+ = \frac{Y_2 + Y_4}{2} \quad (\text{II. 9})$$

De la même manière, les effets moyens pour le facteur  $x_2$  sont calculés et présentés dans les équations II.10 et II.11.

$$a_2^- = \frac{Y_1 + Y_2}{2} \quad (\text{II. 10})$$

$$a_2^+ = \frac{Y_3 + Y_4}{2} \quad (\text{II. 11})$$

#### b) Effet global d'un facteur

On définit l'effet global d'un facteur comme étant l'écart moyen de la réponse lorsque l'on passe du niveau le plus bas au niveau le plus haut du facteur. Dans le cadre d'un plan factoriel

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

équilibré avec deux niveaux, on estime cet effet en calculant la variation moyenne de la réponse entre les deux niveaux du facteur [7] où chaque niveau est quantifié par son effet moyen.

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

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

Dans un modèle basé sur un polynôme, les coefficients des termes de premier degré correspondent aux effets des différents facteurs.

### c) Réponse théorique

Cette valeur représente la moyenne des réponses enregistrées aux deux niveaux expérimentaux, -1 et +1.

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

### d) Effets des interactions

Lorsqu'on calcule l'effet d'une interaction parmi les variables  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , nous introduisons une nouvelle colonne nommée  $x_i x_j \dots x_k$  dans la matrice des effets. Cette colonne est obtenue en multipliant les valeurs correspondantes des colonnes des variables concernées. L'effet moyen et l'effet global de cette interaction se calculent comme pour l'effet d'un facteur isolé. Le Tableau II.4 illustre cette matrice pour les effets principaux et d'interaction dans un plan factoriel complet à deux facteurs.

**Tableau II.4.** Matrice d'expériences avec effets pour un plan factoriel complet  $2^2$

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

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

Par conséquent, Le coefficient  $I_{12}$  représente la variation de l'impact de  $x_1$  en fonction des ajustements de  $x_2$ , et vice versa. De manière similaire, il indique également comment l'effet de  $x_2$  varie en réponse à des changements dans le niveau de  $x_1$ .

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

Par conséquent, on peut exprimer le modèle mathématique linéaire sous la forme de l'équation II.16

$$y = a_0 + x_1 a_1 + x_2 a_2 + I_{12} x_1 x_2 + e \quad (\text{II. 16})$$

### II.8.2. Plans factoriels complets à trois niveaux

Dans ce type de plans factoriels, chaque facteur est évalué à trois niveaux distincts, -1 , +1 et entre -1 et +1. Cette limitation à trois niveaux, lorsqu'elle est appliquée dans une expérience factorielle complète, réduit le nombre d'essais nécessaires et offre une étude complète de tous les facteurs et de leurs interactions. On peut aussi représenter les niveaux des facteurs en utilisant les chiffres 0 (pour bas), 1 (pour intermédiaire) et 2 (pour haut). Des exemples de ces plans pour deux et trois facteurs sont représentés dans la Figure II.7 [118].

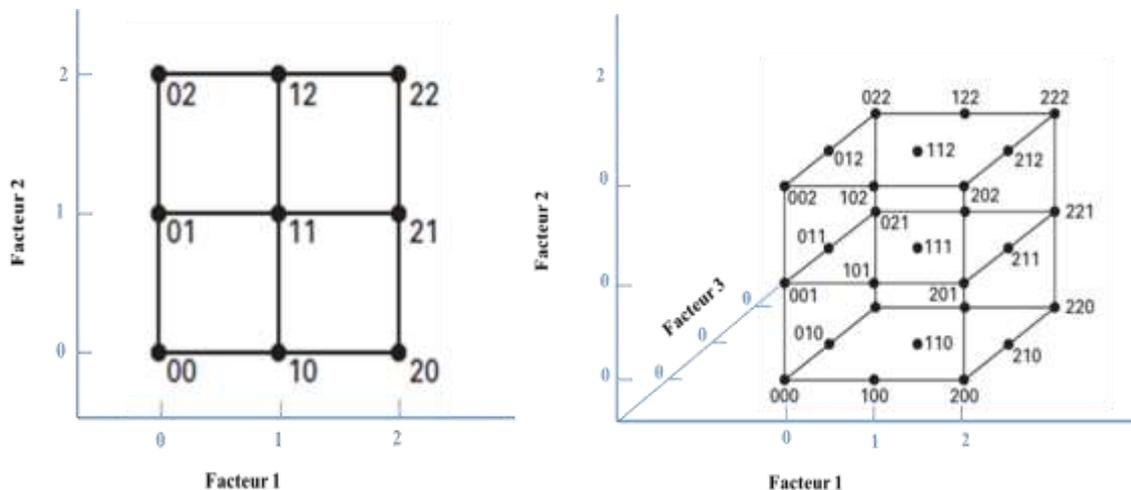


Figure II.7. Plans factoriels complets  $3^2$  et  $3^3$

#### II.8.2.1. Matrice d'expériences

Un plan pour lequel nous avons k facteurs est appelé un plan  $3^k$ . Le nombre d'expériences à réaliser sera donc  $3^k$  expériences. Ce nombre devient rapidement très important.

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### a) Plans factoriels complets $3^2$

Dans le contexte des plans factoriels complets  $3^2$ , l'organisation des matrices d'expériences suit une structure spécifique, Voici comment elles sont généralement organisées [118]:

- i) **Nombre de facteurs** : Un plan factoriel complet  $3^2$  implique 2 facteurs, chacun à 3 niveaux.
- ii) **Nombre d'expériences** : Pour un plan factoriel complet  $3^2$ , il y a  $3^2 = 9$  expériences (combinaisons) à réaliser.
- iii) **Matrice d'expériences** : La matrice d'expériences est une table de 9 lignes (une pour chaque expérience) et 3 colonnes (une pour chaque facteur, plus une colonne pour la réponse ou la variable dépendante).
- iv) **Codage des niveaux des facteurs** : Les niveaux des facteurs sont généralement codés comme suit :
  - Niveau bas (-1)
  - Niveau moyen (0)
  - Niveau haut (+1)
- v) **Structure de la matrice** : La matrice d'expériences est construite de manière à représenter toutes les combinaisons possibles des niveaux des deux facteurs. Voici un exemple de structure pour un plan factoriel complet  $3^2$  :

**Tableau II.5.** Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets  $3^2$

Exp	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1
2	0	-1
3	+1	-1
4	-1	0
5	0	0
6	+1	0
7	-1	+1
8	0	+1
9	+1	+1

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### b) Plans factoriels complets $3^3$

L'organisation des matrices d'expériences suit une structure similaire, mais avec trois facteurs au lieu de deux. Voici comment elles sont généralement organisées [118]:

- i) **Nombre de facteurs** : Un plan factoriel complet  $3^3$  implique 3 facteurs, chacun à 3 niveaux.
- ii) **Nombre d'expériences** : Pour un plan factoriel complet  $3^3$ , il y a  $3^3 = 27$  expériences (combinaisons) à réaliser.
- iii) **Matrice d'expériences** : La matrice d'expériences est une table de 27 lignes (une pour chaque expérience) et 4 colonnes (une pour chaque facteur, plus une colonne pour la réponse ou la variable dépendante).
- iv) **Codage des niveaux des facteurs** : Les niveaux des facteurs sont généralement codés de la même manière que pour le plan  $3^2$ , c'est-à-dire :
  - Niveau bas (-1)
  - Niveau moyen (0)
  - Niveau haut (+1)
- v) **Structure de la matrice** : La matrice d'expériences est construite de manière à représenter toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs. Voici un exemple de structure pour un plan factoriel complet  $3^3$  :

**Tableau II.6.** Organisation des matrices d'expériences dans le contexte des plans factoriels complets  $3^3$

Exp	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1
2	0	-1	-1
3	+1	-1	-1
4	-1	0	-1
5	0	0	-1
6	+1	0	-1
7	-1	+1	-1

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

8	0	+1	-1
9	+1	+1	-1
10	-1	-1	0
11	0	-1	0
12	+1	-1	0
13	-1	0	0
14	0	0	0
15	+1	0	0
16	-1	+1	0
17	0	+1	0
18	+1	+1	0
19	-1	-1	+1
20	0	-1	+1
21	+1	-1	+1
22	-1	0	+1
23	0	0	+1
24	+1	0	+1
25	-1	+1	+1
26	0	+1	+1
27	+1	+1	+1

Le modèle avec interactions d'ordre 2 évalue les effets des interactions entre deux facteurs. Ces effets sont mesurés et exprimés à travers les coefficients  $I_{ij}$  et  $a_{ii}$  dans l'équation II.17.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum_{i < j}^k I_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k x_i^2 a_{ii} + e \quad (\text{II.17})$$

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### II.8.3. Régression linéaire et analyse du modèle

#### II.8.3.1. Régression linéaire

Après réalisation du plan d'expériences, il est possible d'établir un système de  $n$  équations pour les  $n$  essais et de résoudre pour  $p$  inconnues représentant les  $p$  coefficients du modèle. Cette formulation est simplifiée en utilisant la notation matricielle. Il existe souvent un écart entre les réponses calculées par le modèle et celles mesurées expérimentalement, cet écart de modélisation est exprimé par le vecteur  $a$

$$y = Xa + e \quad (\text{II. 18})$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{p1} \\ 1 & x_{21} & & x_{p1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{p1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (\text{II. 19})$$

Où :

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

Dans ce cas, le système ne peut pas être résolu directement du fait que le nombre d'équations ( $n$ ) est habituellement moins élevé que celui des inconnues ( $pn$ ). Pour surmonter ce problème, on utilise une méthode de régression, souvent celle des moindres carrés, pour estimer les coefficients, lesquels sont représentés dans le vecteur  $\hat{a}$ .

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} (X^t) (Y) \quad (\text{II. 20})$$

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

Il existe divers logiciels qui facilitent le calcul direct des coefficients, rendant cette tâche plus accessible.

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

### II.8.3.2. Test de validation du modèle

L'analyse de la variance (ANOVA) aide à déterminer le seuil de significativité des effets des facteurs. Cette évaluation se fait en comparant la variation causée par le facteur, intégré dans le modèle, à la variance résiduelle. Si le facteur est omis du modèle, son effet est alors inclus dans la variance résiduelle. Examiner les fluctuations de cette variance résiduelle aide à déterminer si le facteur a une influence notable sur la réponse. Cette évaluation se fait en comparant la variation causée par le facteur, intégré dans le modèle, à la variance résiduelle. Si le facteur est omis du modèle, son effet est alors inclus dans la variance résiduelle. Examiner les fluctuations de cette variance résiduelle aide à déterminer si le facteur a une influence notable sur la réponse [117].

Dans les situations où l'on compare plus de deux échantillons, l'ANOVA est utilisée pour déceler si des différences significatives existent entre les moyennes des échantillons. Cette analyse comprend le test F (Fisher-Snedecor), qui évalue la signification globale de la régression, sans fournir d'information sur la signification individuelle de chaque coefficient. Pour cela, le test de Student est utilisé, examinant la signification de chaque coefficient séparément.

Cela implique la vérification des hypothèses suivantes:

$$H_0: a_1 = a_2 = \dots = a_p = 0$$

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

La variance totale de la variable à expliquer se divise en deux composantes : la part expliquée par le modèle et la part correspondant à la variance résiduelle.

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

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

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

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

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

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

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

En tenant compte de ces notations :

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

La variance moyenne pour chaque composant du modèle. Par exemple, le Carré Moyen pour la Liaison mesure la variance expliquée par le modèle, tandis que le Carré Moyen pour les Résidus et le Carré Moyen Total évalue la variance due aux erreurs ou à l'inexactitude du modèle. Ces valeurs sont calculées en divisant les sommes des carrés (*CML*, *CMR* et *CMT*), par leurs degrés de liberté respectifs. Cela normalise la somme des carrés par rapport au nombre d'observations ou de paramètres dans le modèle.

- *SCEL* possède  $p - 1$  degrés de liberté où "p" est le nombre de coefficients estimés dans le modèle. Cela signifie que si le modèle a, par exemple, 6 coefficients, la *SCEL* aura 5 degrés de liberté.
- *SCER* possède  $n - p$  degrés de liberté où "n" représente le nombre total d'expériences réalisées. Donc, si 50 expériences sont réalisées et le modèle a 6 coefficients, la *SCER* aurait 44 degrés de liberté.
- *STCE* possède  $n - 1$  degrés de liberté. avec "n" étant le nombre d'expériences. Ainsi, si 50 expériences sont réalisées, la *STCE* aurait 49 degrés de liberté.

Le format standard d'un tableau d'analyse de variance (ANOVA) est organisé comme suit:

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

Tableau II.7. Tableau d'ANOVA

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

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

- Calcul du F observé ( $F_{cal}$ ) : Ce calcul est réalisé dans le tableau d'ANOVA, en comparant la variance expliquée par le modèle avec la variance résiduelle (erreur).
- Lecture du F critique ( $F_{crit}$ ) : On détermine cette valeur à partir du Tableau de Fisher-Snedecor en utilisant les degrés de liberté. Les degrés de liberté du numérateur sont  $ddl_1 = p - 1$  et ceux du dénominateur sont  $ddl_2 = n - p$  où  $p$  est le nombre de coefficients estimés et  $n$  le nombre total d'expériences.
- Fixation du niveau de risque  $\alpha$  : Le seuil  $\alpha$  est choisi à l'avance, souvent à 0,05 ou 0,01, représentant la probabilité acceptable d'erreur de Type I (rejet à tort de l'hypothèse nulle).
- Comparaison de  $F_{cal}$  avec  $F_{crit}$ : L'hypothèse nulle ( $H_0$ ), qui stipule généralement qu'il n'y a pas de différence significative ou aucun effet du modèle, est rejetée si  $F_{cal} > F_{crit}$

L'acceptation ou le rejet de l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) dans une analyse de la variance (ANOVA) a des implications significatives pour l'interprétation des résultats

**Accepter  $H_0$**  : Conclure qu'il n'existe pas de relation globale significative entre les variables indépendantes  $x_i$  et la variable dépendante  $y$ . Cela peut être dû à plusieurs raisons :

- **Modèle Inadéquat** : Le modèle statistique utilisé pourrait ne pas être approprié pour capturer la relation entre les variables. Cela peut être dû à un mauvais choix de

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

variables, à une mauvaise spécification du modèle, ou à l'absence de certaines variables importantes.

- **Peu ou Pas d'Influence des  $x_i$  sur  $y$**  : Il est possible que les variations dans les variables indépendantes  $x_i$  n'aient qu'une influence mineure ou aucune influence sur la variable dépendante  $y$ . Cela indique que d'autres facteurs, non inclus dans le modèle, pourraient être responsables de la variation observée dans  $y$ .

**Rejeter  $H_0$**  : Cette conclusion implique qu'il existe une relation significative entre les variations des variables indépendantes  $x_i$  et la variation de la variable dépendante  $y$ . Cela signifie que les changements dans  $x_i$  sont statistiquement associés à des changements dans  $y$ , indiquant que le modèle est capable de capturer une part significative de la relation entre ces variables.

Autrement dit :

- Si  $F_{cal} > F_{crit}$  : alors le modèle de régression linéaire est considéré comme valide. Cela signifie que les variables indépendantes incluses dans le modèle ont un effet significatif sur la variable dépendante.
- En revanche, cela suggère que le modèle n'explique pas de manière significative la variation dans les données et que les variables indépendantes ne sont pas utiles pour prédire la variable dépendante.

### II.9. Logiciels de plans d'expériences

La création des plans d'expériences peut sembler simple et facile, car il est parfois possible de choisir parmi des matrices déjà publiées. Cependant, il est essentiel que le plan soit véritablement adapté à l'étude et à ses objectifs, plutôt que de tenter d'adapter l'étude au plan préexistants. Dans certaines situations, il est donc impératif de concevoir un plan sur mesure pour obtenir des résultats pertinents et significatifs.

Heureusement, les logiciels spécialisés dans la conception des plans d'expériences offrent des bibliothèques des plans classiques qui peuvent être utiles dans des nombreuses situations. De plus, ces logiciels permettent également de construire des plans d'expériences spécifiques et personnalisés pour répondre aux besoins uniques d'une étude particulière. Cette flexibilité permet aux chercheurs de créer des plans d'expériences optimisés en fonction de leurs

## Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience

---

paramètres d'intérêt et de leurs contraintes expérimentales, garantissant ainsi une meilleure qualité des données et des conclusions plus robustes.

L'estimation des coefficients d'un modèle de régression peut être réalisée à l'aide de logiciels de feuille de calcul, mais cela nécessite généralement une programmation et un investissement en temps considérable. Par conséquent, il est souvent préférable d'utiliser un logiciel adapté à l'analyse de régression, car il effectue non seulement le calcul des coefficients, mais également les calculs statistiques nécessaires pour évaluer la qualité du modèle mathématique.

Les logiciels spécialisés dans l'analyse de régression, tels que JMP, Minitab, Statistica, Statgraphics, Unscrambler, Pirouette, Modde, Stats Models ou scikit-learn ou d'autres logiciels statistiques, simplifient grandement le processus d'estimation des coefficients et d'évaluation du modèle. Ils fournissent des résultats statistiques tels que les valeurs p, les valeurs  $R^2$ , les intervalles de confiance, les tests de significativité des coefficients, les diagnostics des résidus, et bien d'autres, ce qui permet aux chercheurs d'obtenir une compréhension approfondie de la qualité de leur modèle.

En utilisant un logiciel spécialisé, les chercheurs peuvent gagner du temps, éviter des erreurs de programmation potentielles et avoir accès à une gamme complète d'outils statistiques pour une analyse approfondie de leurs données de régression, ce qui est essentiel pour prendre des décisions éclairées basées sur les résultats du modèle.

### II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé des éléments bibliographiques essentiels liés à la Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE). Tout d'abord, nous avons passé en revue et présenté les différents types de variables utilisées dans cette méthodologie. Nous avons également donné des définitions claires du domaine d'étude, qui représente la plage de valeurs des variables d'intérêt, ainsi que du domaine d'étude possible, qui peut être soumis à des contraintes, que ce soit en termes de positions ou de valeurs atteintes par les variables.

Le deuxième volet de ce chapitre a mis l'accent sur un aspect fondamental de la MPE : la modélisation. Nous avons examiné les principales techniques mathématiques employées pour exprimer les variations des réponses en fonction des valeurs des facteurs. La modélisation joue un rôle crucial dans la MPE, car elle permet de comprendre comment les variables d'entrée

## **Chapitre II : Méthodologie des plans d'expérience**

---

(facteurs) influencent les variables de sortie (réponses) et de formuler des relations mathématiques qui décrivent ces relations.

Les Plans d'Expériences (PE) sont principalement un outil de gestion et d'organisation des campagnes expérimentales. Leur objectif principal est de fournir des informations facilement interprétables. Pour ce faire, la conception des expériences doit permettre de créer un modèle exploratoire du domaine expérimental, ce modèle étant la pierre angulaire de la stratégie expérimentale.

Il existe plusieurs familles de modèles en fonction des objectifs des expérimentateurs. Lorsqu'ils sont correctement utilisés, les PE peuvent conduire à des avantages significatifs, notamment dans les phases de développement de produits. Cela peut se traduire par des délais de conception et de production réduits, des coûts plus bas, une plus grande précision dans l'obtention des résultats expérimentaux et une amélioration de la fiabilité des conclusions.

On peut résumer la procédure employée pour conduire une expérimentation de manière optimale en un schéma synthétique comprenant trois principales étapes :

- Sélection de la méthode expérimentale appropriée.
- Évaluation des résultats obtenus.
- Progression dans l'acquisition des résultats au fil du temps.

# Chapitre III

# Chapitre III : Méthodes expérimentales

---

## III.1. Introduction

Dans ce chapitre, une optimisation de la méthodologie de surface de réponse (MSR) du flux thermique est également tentée pour assurer une bonne qualité de soudage. Après quelques rappels sur les plans d'expérience, nous définirons celui qui a servi de base à notre étude expérimentale pour étudier l'impact des paramètres importants de la soudure longitudinale sur l'apport de chaleur ont été modélisés.

Les différents paramètres utilisés sont :

- $c_p$  Capacité thermique spécifique [J/kg\*K]
- $dA$  Surface infinitésimale
- $dF_f$  Force de forgeage infinitésimale
- $d\theta$  Angulaire infinitésimale
- $Dr$  Rayon infinitésimal
- $dQ$  Génération de chaleur infinitésimale
- $H_p$  Hauteur du palpeur de l'outil [mm]
- $K$  Conductivité thermique [W/m\*K]
- $R_{hp}$  Rayon du palpeur d'outil [mm]
- $R_s$  Rayon d'épaulement de l'outil [mm]
- $t$  Épaisseur de la pièce [mm]
- $TRS$  Vitesse de rotation de l'outil [tr/min]
- $WS$  Vitesse de soudage [mm/s]
- $\omega$  Vitesse angulaire de rotation de l'outil [Rad/s]
- $\vartheta$  Vitesse transversale de l'outil de  $\omega * r$  [m/s]

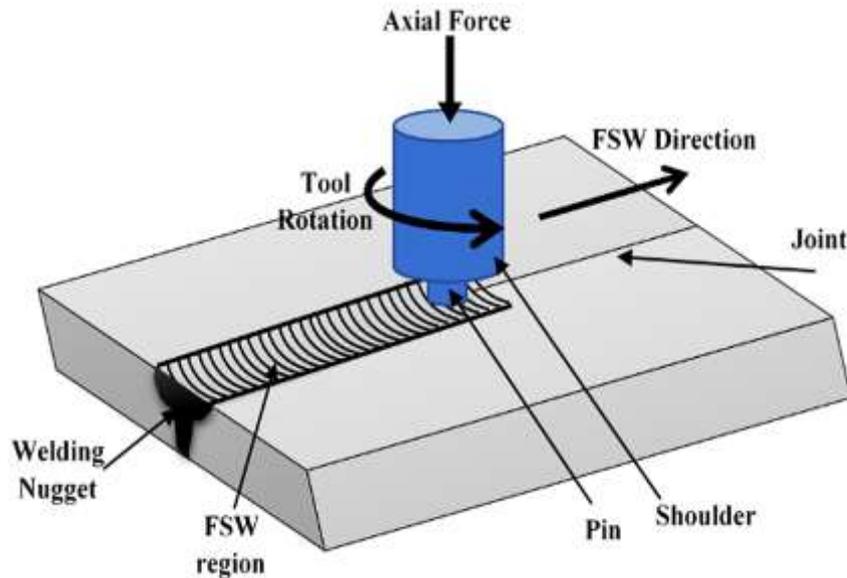
## III.2. Protocole expérimentale

### III.2.1. Matériau de base

Les tôles sont fournies en alliage d'aluminium Al-MgSi de  $200 \times 50 \times 3$  mm<sup>3</sup> ont été utilisées comme matériau de base (voir Figure III.1). L'alliage d'aluminium Al-MgSi est un alliage structural de la série 6xxx contenant du magnésium et du silicium comme principaux éléments d'alliage. Cet alliage se distingue par ses bonnes propriétés mécaniques après traitement thermique, sa résistance à la corrosion, son aptitude à l'anodisation et sa bonne

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

soudabilité. Son utilisation est très répandue dans diverses industries, notamment l'architecture, la construction et les transports, en raison de ses propriétés polyvalentes. Ce procédé est idéal pour les applications de moulage à température très élevées après refroidissement, Bien que le matériau puisse être redressé ou nivelé, cela n'affecte pas ses propriétés mécaniques. Cette technique est également utilisée pour le vieillissement artificiel des produits en aluminium.



**Figure III.1.** Schéma du procédé FSW [66]

Le tableau III.1 détaille la composition élémentaire ainsi que le tableau III.2 expose les caractéristiques et les propriétés de l'alliage.

**Tableau III.1.** Composition chimique de l'alliage d'aluminium Al-MgSi (%)

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Min	0.03	0.10			0.35			
Max	0.60	0.30	0.10	0.10	0.60	0.05	0.15	0.10

**Tableau III.2.** Propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium Al-MgSi

E (MPa)	Rp (MPa)	A (%)	v	d (kg/cm <sup>3</sup> )	Fusion T (°C)	λ (W/m .K)	Cp (J/Kg .K)
69 500	120	150	0.33	2.7	655	209	898

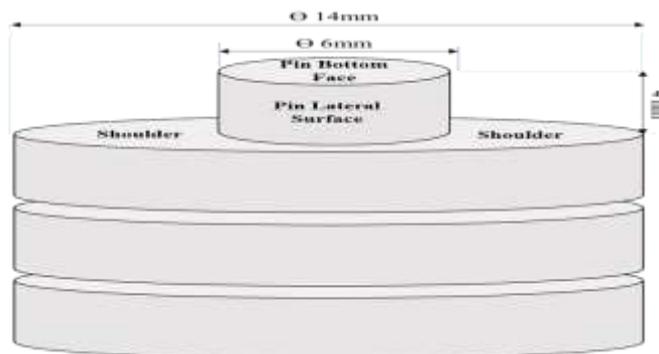
## Chapitre III : Méthodes expérimentales

### III.2.2. Outils de soudage

L'acier X153CrMoV12 est un acier au chrome pour outillage, communément appelé acier D2 selon la désignation américaine. Les aciers à outils Caractéristiques :

- Bonne dureté (jusqu'à 56-60 HRC)
- Résistance modérée à la corrosion grâce à la teneur en chrome
- Trempé et revenu pour obtenir la structure martensitique
- Bon compromis résistance mécanique élevée/dureté
- Bonne résistance à la corrosion grâce à la teneur en chrome

(Composition typique donnée dans le Tableau III.3), L'outil de soudage FSW principal utilisé dans ce travail (voir Figure III.2), est composé d'un épaulement de 14 mm de diamètre avec une tige cylindrique filetée de 6 mm de diamètre et de 4 mm de hauteur.



**Figure III.2.** Régions/interfaces de l'entrée des énergies et de la géométrie de l'outil du procédé FSW

**Tableau III.3.** Composition chimique (% en poids) du matériau de l'outil X153CrMoV12

C	Si	Mn	P max	S max	Cr
1.9-2.2	0.1-0.6	0.2-0.6	0.03	0.03	11-13

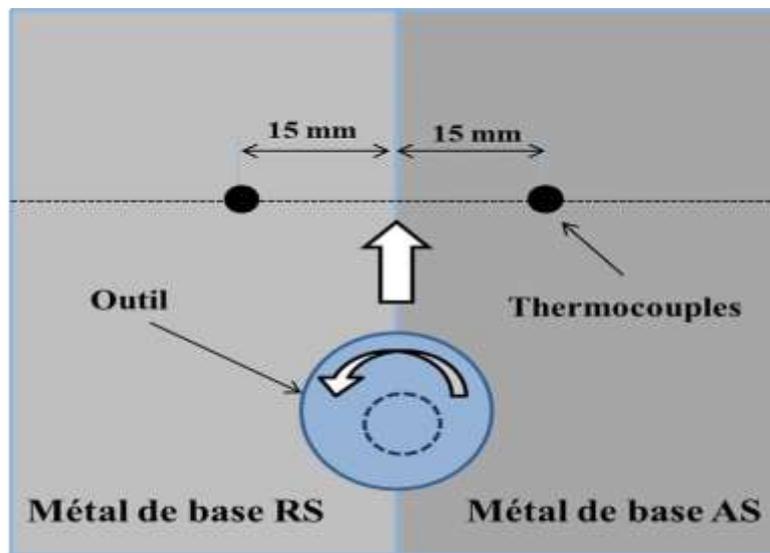
### III.2.3. Machine de soudage

La base de cette méthode est l'utilisation d'une fraiseuse conventionnelle adaptée. Cette machine, fréquemment employée dans les opérations industrielles d'usinage, Elle est apte à réaliser la soudure de plaques en certains alliages d'aluminium jusqu'à une épaisseur de 15 mm.

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

### III.2.4. Essais réalisés

Neuf expériences avec deux facteurs, tous deux au niveau trois, ont été sélectionnées pour réaliser les expériences (voir le Tableau III.4). Deux paramètres qui affectent significativement le FSW, à savoir la vitesse de rotation de l'outil (*TRS*) et la vitesse de soudage (*WS*), ont été choisis en fonction de la littérature disponible et de nos travaux précédents. La *TRS* variait entre 200 et 600 tr/min, et la *WS* était comprise entre 0,5 et 1,5 mm/s. Pour une compréhension suffisante de l'apport et du transfert de chaleur pendant le processus, les températures ont été mesurées par des thermocouples sur les deux feuilles de métal de base (Figure III.3).



**Figure III.3.** Position des thermocouples de part et d'autre de la surface de contact.

Les thermocouples utilisés dans cette étude ont été placés à 12 et 15 mm du centre de la surface de contact (voir Figure III.3) qui permet de mesurer la température. Les valeurs de température pour chaque expérience sont également présentées dans le tableau. III.4.

**Tableau III.4.** Température obtenue par les tests expérimentaux

Exp	WS (mm/min)	TRS (tr/min)	Température (K)
01	0.5	200	700.2
02	0.75	200	694.4
03	1.5	200	688.2
04	0.5	300	762.7
05	0.75	300	756.0

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

---

06	1.5	300	749.6
07	0.5	600	807.4
08	0.75	600	801.5
09	1.5	600	797.3

### III.3. Modèle analytique pour la production de chaleur

Le modèle analytique de l'apport de chaleur consiste à identifier les interfaces importantes de l'apport de chaleur entre l'outil et le matériau pendant le procédé FSW. Trois interfaces,  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$ , sont identifiées. L'adéquation de l'apport de chaleur est essentielle pour la solidité du joint et l'évolution des propriétés mécaniques des soudures FSW. La modélisation est basée sur les données essentielles suivantes :

- (1) La contrainte de cisaillement de contact " $\tau_{contact}$ " est uniforme.
- (2) L'agitation assistée par cisaillement se produit uniquement à l'interface intime.
- (3) On a considéré que la déformation plastique pendant l'agitation contribuait à la chaleur par le biais de l'atome.
- (4) Pendant le processus de frottement actuel, la valeur du cisaillement inter-facial résultant du contact et du frottement.
- (5) La déviation de la zone d'interface entre l'épaule et le pion est vue dans les équations  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$ .
- (6) Le modèle n'est pas pris en considération le transfert de chaleur par convection, qui peut faire partie du processus.

Compte tenu de l'épaisseur du matériau, de la forme de l'outil et de la profondeur du plonge ont utilisé dans cette étude, une force de forgeage de 8 kN a été considérée [123].

L'expression générale d'une quantité infinitésimale de chaleur générée dans chacune des différentes zones de l'interface outil/pièce est donnée par la formule suivante l'interface outil/pièce est donnée par

$$dQ = \omega r dF \quad (\text{III. 1})$$

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

---

Cette force est calculée par la relation suivante

$$dF = \tau_{\text{contact}} dA \quad (\text{III. 2})$$

Avec

$$dA = r dr d\theta \quad (\text{III. 3})$$

Où :  $\tau_{\text{contact}}$  est la contrainte de cisaillement de contact.

L'adresse quantité de chaleur par friction et déformation par rapport à la contrainte de cisaillement de contact est donnée par :

$$\tau_{\text{contact}} = \tau_{\text{friction}} = \mu \rho = \mu \sigma \quad (\text{III. 4})$$

Tandis que la contrainte  $\sigma = F_f / A$  (III. 5)

Où :

- $A$  : surface de contact de l'outil.
- $\sigma$  : pression de contact.
- $\mu$  : coefficient de friction.
- $\rho$  : densité.
- $F_f$  : force de forgeage qui a été considérée dès le départ dans les quantités de chaleur initiales.

Comme le montre la Figure III.4, l'apport thermique total ( $Q_T$ ) constitue la somme des apports thermiques des trois. Il a été estimé selon les équations (III.6), (III.7) et (III.8) [124].

### III.3.1. Génération de chaleur depuis l'épaulement

$Q_I$  L'apport de chaleur provenant de l'interface de l'épaulement est donné par (Équation III.6)

$$Q_1 = \int_0^{2\pi} \int_{Rhp}^{Rs} w * r^2 * \mu * \sigma * d\theta * dr \quad (\text{III. 6})$$

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

---

### III.3.2. Génération de chaleur depuis la surface latérale du pion.

La chaleur générée au niveau de la sonde a deux contributions:

$Q_2$ : L'apport de chaleur provenant de l'interface latérale du pion est donné par (Équation III.7)

$$Q_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{H_p} w * r^2 * \mu * \sigma * d\theta * dz \quad (\text{III. 7})$$

$Q_3$  L'apport de chaleur provenant de l'interface du fond du pion est donné par (Équation III.8)

$$Q_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{Rhp} w * r^2 * \mu * \sigma * d\theta * dr \quad (\text{III. 8})$$

Ainsi, le  $Q_T$ , peut être déduit comme la somme des apports de chaleur des trois interfaces comme suit

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{III. 9})$$

L'apport de chaleur donné par l'équation III.9 peut être développé davantage pour obtenir un apport de chaleur total par unité de longueur. L'équation III.10 [123] peut être utilisée pour trouver l'apport thermique total pour une unité de longueur de soudure lorsque la condition de contact glissant est prise en compte :

$$Q_T = \frac{1}{l} * \{Q_1 + Q_2 + Q_3\} \quad (\text{III. 10})$$

L'énergie effective pour une unité de longueur de la soudure est estimée selon l'équation III.11 comme un rapport de la longueur de la goupille  $H_p$  sur l'épaisseur de la plaque ' $t$ ' et multipliée par l'énergie par unité de longueur de la [67].

$$Q_{eff} = \left(\frac{H_p}{t}\right) * Q_{\frac{E}{wl}} \quad (\text{III. 11})$$

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

La température de soudage ( $T_w$ ), la température de solidus ( $T_s$ ) et l'énergie effective appliquée par longueur unitaire de la soudure. de soudure sont liées empiriquement selon l'équation III.12) [3]

$$\frac{T_w}{T_s} = \alpha * Q_{eff} + \left( \frac{\mu * R_{hp}}{R_{hp}} \right) \quad (\text{III. 12})$$

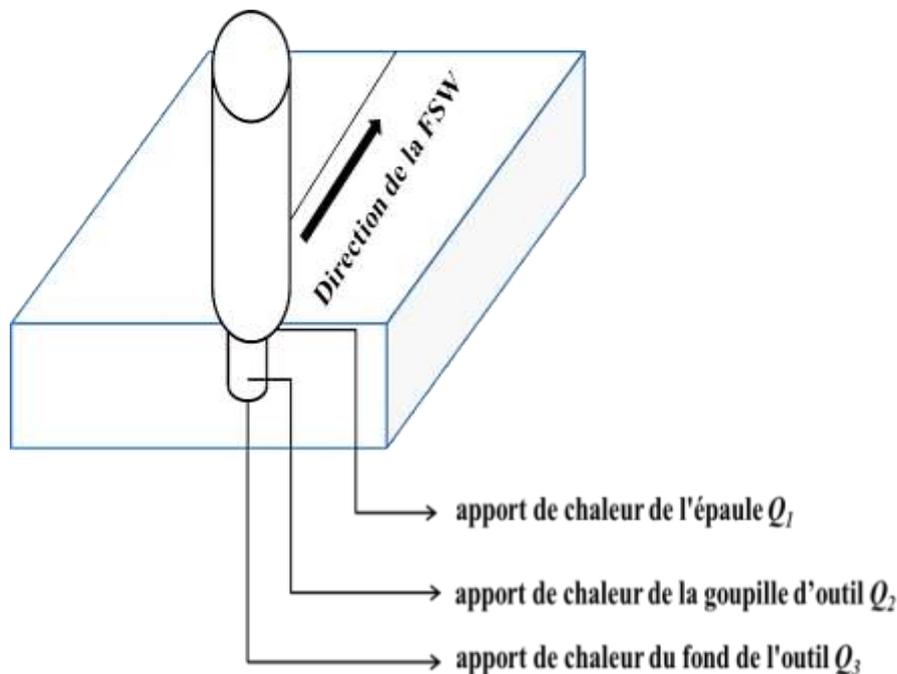
Où :

$$\alpha = \frac{K}{c_p * \rho}$$

Le calcul a été effectué en considérant trois faces de l'outil qui ont contribué à l'apport de chaleur, comme le montre la Figure III.4.

Le Tableau III.5 donne le résultat du calcul, représentant la température et l'apport de chaleur de chaque interface. Les notations sont les suivantes :

- $Q_1$  représente l'apport de chaleur provenant de la surface de l'épaulement ;
- $Q_2$  représente l'apport de chaleur provenant de la surface latérale du pion ;
- $Q_3$  représente l'apport de chaleur provenant du fond du pion (comme indiqué dans le tableau III.4).



**Figure III.4.** Zones de génération de chaleur entre les pièces et l'outil

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

On obtient alors le tableau suivant :

**Tableau III.5.** Température et apport de chaleur obtenus par simulation

Exp	WS (mm/s)	TRS (tr/min)	Apport de chaleur de			Température (K)
			Épaulement $Q_1$ (W)	Goupille de l'outil $Q_2$ (W)	Fond de l'outil $Q_3$ (W)	
01	0.5	200	2.97	250.1	45.6	700.2
02	0.75	200	3.05	252.8	46.1	694.4
03	1.5	200	3.17	258.5	47.7	688.2
04	0.5	300	3.72	213.9	61.9	762.7
05	0.75	300	3.72	215.5	62.1	756.0
06	1.5	300	3.88	216.2	63.4	749.6
07	0.5	600	4.23	164.3	76.2	807.4
08	0.75	600	4.31	168.1	77.0	801.5
09	1.5	600	4.47	172.3	77.4	797.3

### III.4. Modélisation du phénomène

#### III.4.1. Calcul des effets des facteurs

Le Tableau orthogonal (**Orthogonal Array OA**), comme indiqué dans le Tableau III.6, représente les niveaux codés des paramètres [115, 125]. Cette nécessité nous oblige à effectuer une transformation numérique pour obtenir toutes les valeurs des variables dans la plage de -1 à +1. Cette procédure facilite le traitement et la modélisation des données.

La formule utilisée pour le codage est la suivante

$$X_i = [u_i - (u_{min} + u_{max})/2]/[(u_{max} - u_{min})/2] \quad (\text{III. 13})$$

Pour le facteur (**WS**) comme on peut le constater, la valeur minimale est (0.5) et la valeur maximale est (1.5), les nouvelles valeurs codées seront comme suivies :

$$X_{\min(\text{codée})} = [0.5 - (0.5 + 1.5)/2]/[(1.5 - 0.5)/2] = -1 \text{ (Valeur minimale)}$$

$$X_{\max(\text{codée})} = [1.5 - (0.5 + 1.5)/2]/[(1.5 - 0.5)/2] = +1 \text{ (Valeur maximale)}$$

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

En procédant de la même manière pour les autres valeurs de ce facteur on aura

$$X_{3(\text{codée})} = [0.75 - (0.5 + 1.5)/2]/[(1.5 - 0.5)/2] = -0.5$$

On utilise la même méthode pour le facteur (*TRS*),

$$X_{\min(\text{codée})} = [200 - (200 + 600)/2]/[(600 - 200)/2] = -1 \text{ (Valeur minimale)}$$

$$X_{\max(\text{codée})} = [600 - (200 + 600)/2]/[(600 - 200)/2] = +1 \text{ (Valeur maximale)}$$

$$X_{3(\text{codée})} = [300 - (200 + 600)/2]/[(600 - 200)/2] = -0.5$$

Les valeurs codées obtenues sont mentionnées dans le Tableau ci-dessous.

**Tableau III.6.** Valeurs des paramètres codés

Exp	WS (mm/s)	TRS (tr/min)	Apport de chaleur prédit par		
			Epaulement $Q_1$ (W)	Goupille de l'outil $Q_2$ (W)	Fond de l'outil $Q_3$ (W)
01	-1	-1	2.97	250.1	45.6
02	-0.5	-1	3.05	252.8	46.1
03	1	-1	3.17	258.5	47.7
04	-1	-0.5	3.72	213.9	61.9
05	-0.5	-0.5	3.72	215.5	62.1
06	1	-0.5	3.88	216.2	63.4
07	-1	1	4.23	164.3	76.2
08	-0.5	1	4.31	168.1	77.0
09	1	1	4.47	172.3	77.4

### III.4.2. Calcul interaction entre les deux facteurs

Pour modéliser notre plan d'expérience il faut calculer l'interaction d'ordre deux entre (*WS*) et (*TRS*) ; on doit calculer en plus des interactions des autres facteurs d'ordre 2 qui représente les carrés de chaque facteur (*WS*)<sup>2</sup> et (*TRS*)<sup>2</sup> ; on obtient alors le Tableau III.7 suivants qui englobe tous les paramètres de notre modèle :

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

Tableau III.7. Tableau récapitulatif des facteurs et les interactions

Exp	WS ( $x_1$ )	TRS ( $x_2$ )	Interaction WS x TRS ( $I_{12}$ )	( $x_1$ ) <sup>2</sup>	( $x_2$ ) <sup>2</sup>
01	-1	-1	1	1	1
02	-0.5	-1	0.5	0.25	1
03	1	-1	-1	1	1
04	-1	-0.5	0.5	1	0.25
05	-0.5	-0.5	0.25	0.25	0.25
06	1	-0.5	-0.5	1	0.25
07	-1	1	-1	1	1
08	-0.5	1	-0.5	0.25	1
09	1	1	1	1	1

### III.4.3. Réalisation du modèle mathématique

L'analyse numérique pour l'estimation a été réalisée en utilisant les moindres carrés. Un polynôme du second degré a été considéré, et les termes d'ordre supérieur ont été négligés. Les termes au carré sont généralement suffisants pour représenter les courbes de surface. L'équation III.14 est la forme générale du modèle polynomial.

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k x_i a_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k I_{ij} x_i x_j \quad (\text{III. 14})$$

La forme développée de l'équation III.18 pour trois paramètres est donnée par l'équation III.15.

$$y_i = a_0 + x_{i1} a_1 + x_{i2} a_2 + I_{12} x_{i1} x_{i2} + x_{i1}^2 a_{11} + x_{i2}^2 a_{22} + e_i \quad (\text{III. 15})$$

Sachant que le terme  $e_i$  représente la différence entre la valeur expérimentale et celle donnée par le polynôme, et que  $I_{12}$  est l'interaction entre les variables.

Les termes  $a_{ii}$  représentent les coefficients des carrés de chaque facteur puisqu'on a un polynôme du second degré.

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

En appliquant cela aux neuf ensembles expérimentaux, on peut élaborer une matrice comme indiqué ci-dessous

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{11} x_{12} & x_{11}^2 & x_{12}^2 \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{12} x_{22} & x_{21}^2 & x_{22}^2 \\ 1 & x_{31} & x_{32} & x_{31} x_{32} & x_{31}^2 & x_{32}^2 \\ 1 & x_{41} & x_{42} & x_{41} x_{42} & x_{41}^2 & x_{42}^2 \\ 1 & x_{51} & x_{52} & x_{51} x_{52} & x_{51}^2 & x_{52}^2 \\ 1 & x_{61} & x_{62} & x_{61} x_{62} & x_{61}^2 & x_{62}^2 \\ 1 & x_{71} & x_{72} & x_{71} x_{72} & x_{71}^2 & x_{72}^2 \\ 1 & x_{81} & x_{82} & x_{81} x_{82} & x_{81}^2 & x_{82}^2 \\ 1 & x_{91} & x_{92} & x_{91} x_{92} & x_{91}^2 & x_{92}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_{12} \\ a_{11} \\ a_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \\ e_9 \end{pmatrix}$$

Dans cette équation matricielle, on représente toutes les valeurs des différents facteurs. Les différentes interactions d'ordre 2 ainsi que la valeur moyenne des réponses.

1. **Première colonne** : moyenne générale des réponses ( $a_0$ )
2. **Deuxième colonne** : valeurs du codées du facteur ( $WS$ ).
3. **Troisième colonne** : valeurs du codées du facteur ( $TRS$ ).
4. **Quatrième colonne** : valeur de l'interaction entre ( $WS$ ) et ( $TRS$ ).
5. **Cinquième colonne** : valeur des coefficient ( $WS$ )<sup>2</sup>.
6. **Sixième colonne** : valeur des coefficient ( $TRS$ )<sup>2</sup>.

Les coefficients sont trouvés par l'équation III.16.

$$\text{Coefficients} = (X^t X)^{-1} (X^t) (Y) \quad (\text{III. 16})$$

À l'aide du MATLAB on obtient la matrice X tel que :

$$X =$$

```

1.0000 -1.0000 -1.0000  1.0000  1.0000  1.0000
1.0000 -0.5000 -1.0000  0.5000  0.2500  1.0000
1.0000  1.0000 -1.0000 -1.0000  1.0000  1.0000
1.0000 -1.0000 -0.5000  0.5000  1.0000  0.2500
1.0000 -0.5000 -0.5000  0.2500  0.2500  0.2500
1.0000  1.0000 -0.5000 -0.5000  1.0000  0.2500
1.0000 -1.0000  1.0000 -1.0000  1.0000  1.0000
1.0000 -0.5000  1.0000 -0.5000  0.2500  1.0000
1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000

```

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

Comme le présent travail s'est concentré sur trois sorties ( $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$ ), trois polynômes doivent être formulés de manière à ce que chaque polynôme ait ses propres facteurs en appliquant l'équation III.16 à l'apport de chaleur provenant de l'épaulement, de la surface latérale de la broche et de la face inférieure de la broche.

Le tableau III.8 résume les résultats des coefficients trouvés à l'aide du Matlab.

**Tableau III.8.** Les valeurs des coefficients polynomiaux pour chacune des trois zones de l'outil

Facteur	Apport de chaleur de		
	Epaulement $Q_1$ (W)	Goupille de l'outil $Q_2$ (W)	Fond de l'outil $Q_3$ (W)
a <sub>0</sub>	4.24	189.74	73.09
a <sub>1</sub>	0.102	3.16	0.75
a <sub>2</sub>	0.638	-42.73	15.15
I <sub>12</sub>	0.013	0.27	-0.24
a <sub>11</sub>	-0.004	-1.52	-0.13
a <sub>22</sub>	-0.522	22.94	-11.2

### II.5. Validation du modèle

#### III.5.1. Variation résiduelle

Les trois polynômes peuvent être écrits comme suit (équation (III.17) à (III.19))

**i.** Apport de chaleur de l'épaulement ( $Q_1$ )

$$y_i = 4.24 + 0.102X_1 + 0.638X_2 + 0.013X_1X_2 - 0.004X_1^2 - 0.522X_2^2 + e_i \quad (\text{III. 17})$$

**ii.** Apport de chaleur de la surface latérale du pion ( $Q_2$ )

$$y_i = 189.74 + 3.16X_1 - 42.73X_2 + 0.27X_1X_2 - 1.524X_1^2 + 22.94X_2^2 + e_i \quad (\text{III. 18})$$

**iii.** Entrée de chaleur par la face inférieure du pion ( $Q_3$ )

$$y_i = 73.09 + 0.75X_1 + 15.15X_2 - 0.24X_1X_2 - 0.13X_1^2 - 11.2X_2^2 + e_i \quad (\text{III. 19})$$

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

---

Le RSM a été utilisé pour prédire le maximum aux trois surfaces de soudage effectives et déterminer l'étendue de l'effet des deux paramètres FSW et de leur effet d'interaction (Tableau III.8) sur la température.

À partir des équations (III.17, III.18 et III.19) et en remplaçons les valeurs des Tableaux III.7, on calcule les réponses par notre modèle, les 9 réponses sont dressées dans les Tableaux III.9

**Tableau III.9.** Réponses prédites et observée pour chacune des trois zones de l'outil

Exp	Epaulement $Q_1$ (W)		Goupille de l'outil $Q_2$ (W)		Fond de l'outil $Q_3$ (W)	
	$Y_{observé}$	$Y_{prédite}$	$Y_{observé}$	$Y_{prédite}$	$Y_{observé}$	$Y_{prédite}$
0	2.97	2.9879	250.1	251.0112	45.6	45.5978
1	3.05	3.0358	252.8	253.5978	46.1	46.1991
4.2	3.17	3.1662	258.5	256.7909	47.7	47.6031
3	3.72	3.6925	213.9	212.2978	61.9	61.6991
4	3.72	3.7437	215.5	214.9525	62.1	62.2396
5	3.88	3.8838	216.2	218.3497	63.4	63.4612
6	4.23	4.2396	164.3	164.9909	76.2	76.4031
7	4.31	4.3005	168.1	167.8497	77.0	76.7612
09	4.47	4.4699	172.3	171.8594	77.4	77.4357

### III.5.2. Calcul des résidus

Les calculs statistiques Les calculs statistiques qui permettent de savoir si les effets sont significatifs, de calculer les intervalles de confiance font intervenir le calcul des résidus e, c'est-à-dire la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle.

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

**Tableau III.10.** Les écarts types pour chacune des trois zones de l'outil

Exp	Epaulement $Q_1$ (W)	Goupille de l'outil $Q_2$ (W)	Fond de l'outil $Q_3$ (W)
	$e_i =  Y_{obs} - Y_{préd} $	$e_i =  Y_{obs} - Y_{préd} $	$e_i =  Y_{obs} - Y_{préd} $
01	0.0179	0.9112	0.0022
02	0.0142	0.7978	0.0991
03	0.0038	1.7091	0.0969
04	0.0275	1.6022	0.2009
05	0.0237	0.5475	0.1396
06	0.0038	2.1497	0.0612
07	0.0096	0.6909	0.2031
08	0.0095	0.2503	0.2388
09	0.0001	0.4406	0.0357

**Tableau III.11.** Les valeurs carrées des écarts types pour chacune des trois zones de l'outil.

Exp	Epaulement $Q_1$ (W)	Goupille de l'outil $Q_2$ (W)	Fond de l'outil $Q_3$ (W)
	$e_i^2$	$e_i^2$	$e_i^2$
01	0.0003	0.8304	0.0000
02	0.0002	0.6365	0.0098
03	0.0000	2.9209	0.0094
04	0.0008	2.5669	0.0404
05	0.0006	0.2998	0.0195
06	0.0000	4.6212	0.0038
07	0.0001	0.4774	0.0413
08	0.0001	0.0626	0.0570
09	0.0000	0.1942	0.0013

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

---

### III.5.3. Variation due à la liaison linéaire

1. L'apport de chaleur de l'épaulement ( $Q_1$ ) :

$$SCEL = \sum_{i=1}^n (y_i^{est} - y_{moy})^2 \quad (III. 20)$$

$$\begin{aligned} SCEL &= (2.9879 - 3.7244)^2 + (3.0358 - 3.7244)^2 + (3.1662 - 3.7244)^2 \\ &+ (3.6925 - 3.7244)^2 + (3.7437 - 3.7244)^2 + (3.8838 - 3.7244)^2 \\ &+ (4.2396 - 3.7244)^2 + (4.3005 - 3.7244)^2 + (4.4699 - 3.7244)^2 \end{aligned}$$

$$SCEL = 2.5081$$

### III.5.4. Variation résiduelle

$$SCER = \sum_{i=1}^n (e_i)^2 \quad (III. 21)$$

$$\begin{aligned} SCER &= 0.0179^2 + 0.0142^2 + 0.0038^2 + 0.0275^2 + 0.0237^2 + 0.0038^2 + 0.0096^2 \\ &+ 0.0095^2 + 0.0001^2 \end{aligned}$$

$$SCER = 0.0021$$

### III.5.5. Calcul de la variation totale

$$STCE = SCEL + SCER \quad (III. 22)$$

$$STCE = 2.5081 + 0.0021$$

$$STCE = 2.5101$$

2. L'apport de chaleur de l'épaulement ( $Q_2$ )

$$\begin{aligned} SCEL &= (251.0112 - 212.4111)^2 + (253.5978 - 212.4111)^2 + (256.7909 - \\ &212.4111)^2 + (212.2978 - 212.4111)^2 + (214.9525 - 212.4111)^2 + (218.3497 - \\ &212.4111)^2 + (164.9909 - 212.4111)^2 + (167.8497 - 212.4111)^2 + (171.8594 - \\ &212.4111)^2 \end{aligned}$$

$$SCEL = 11076$$

## Chapitre III : Méthodes expérimentales

---

$$SCER = 0.9112^2 + 0.7978^2 + 1.7091^2 + 1.6022^2 + 0.5475^2 + 2.1497^2 + 0.6909^2 \\ + 0.2503^2 + 0.4406^2$$

$$SCER = 12.6099$$

$$STCE = 11076 + 12.6099$$

$$SCER = 11089$$

3. L'apport de chaleur de l'épaulement ( $Q_3$ )

$$SCEL = (45.5978 - 61.9333)^2 + (46.1991 - 61.9333)^2 + (47.6031 - 61.9333)^2 \\ + (61.6991 - 61.9333)^2 + (62.2396 - 61.9333)^2 \\ + (63.4612 - 61.9333)^2 + (76.4031 - 61.9333)^2 \\ + (76.7612 - 61.9333)^2 + (77.4357 - 61.9333)^2$$

$$SCEL = 1391.8$$

$$SCER = 0.0022^2 + 0.0991^2 + 0.0969^2 + 0.2009^2 + 0.1396^2 + 0.0612^2 + \\ 0.2031^2 + 0.2388^2 + 0.0357^2$$

$$SCER = 0.1824$$

$$STCE = 1391.8 + 12.6099$$

$$SCER = 1392$$

# Chapitre IV

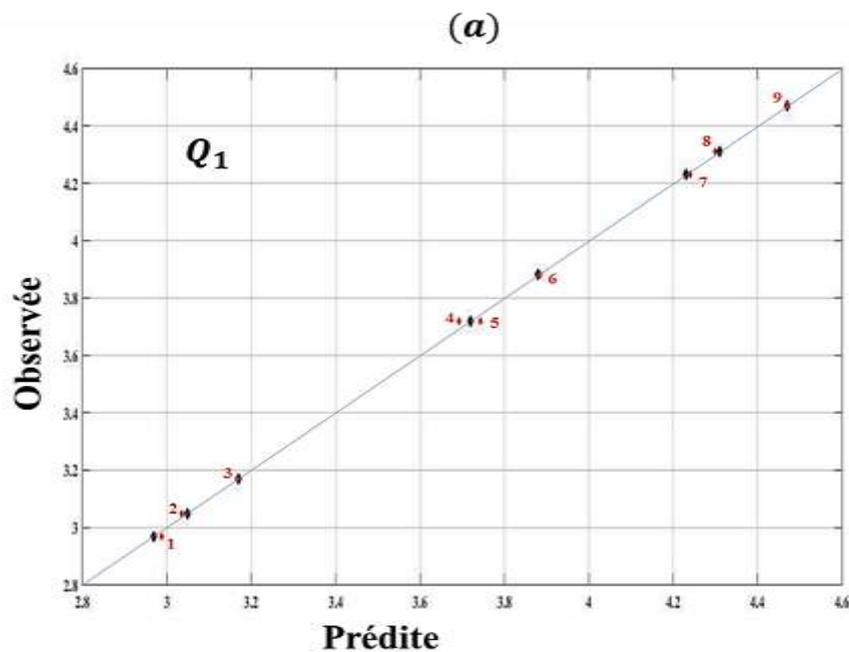
### IV.1. Introduction

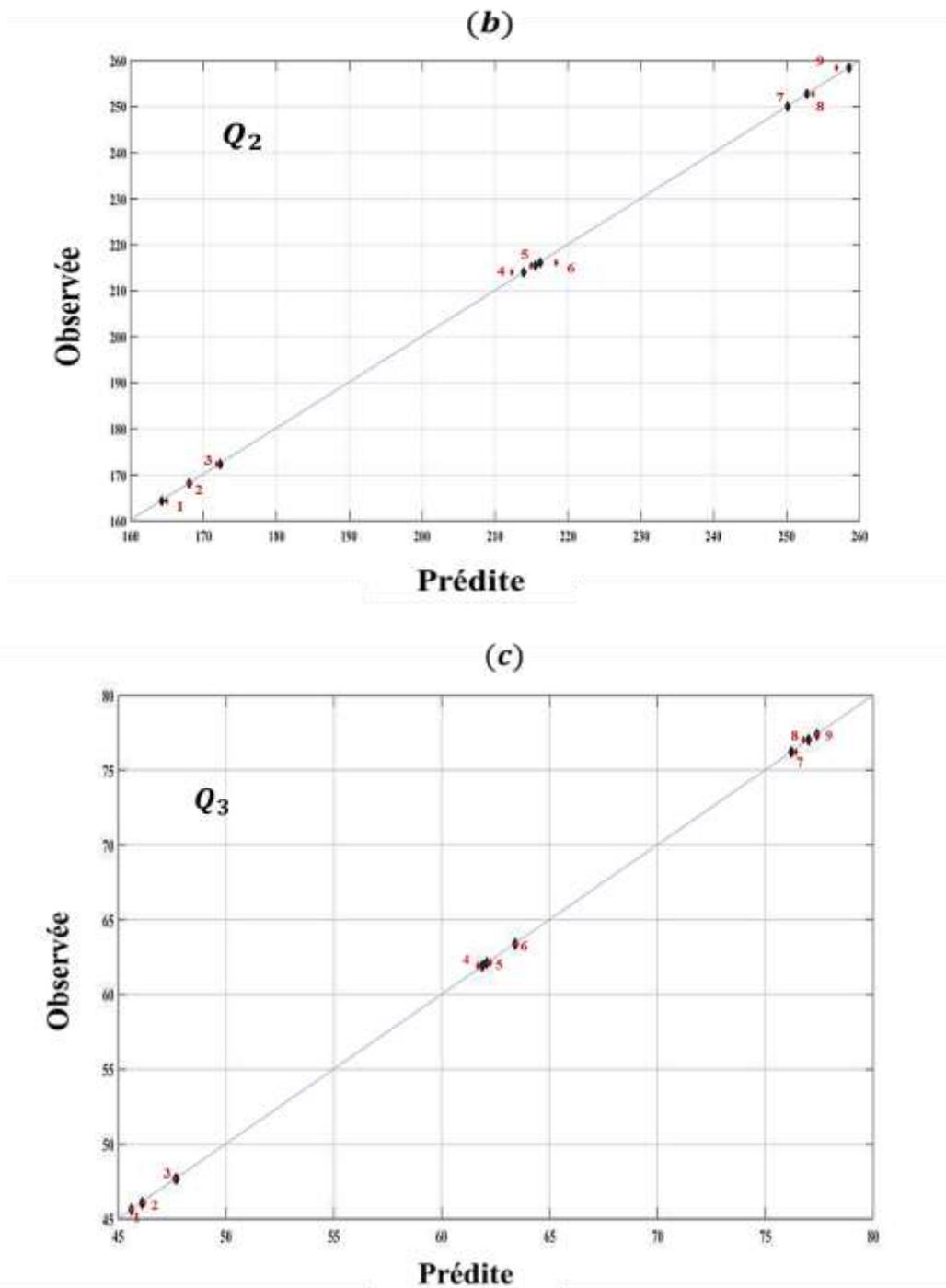
Cette étude utilise des approches de simulation et de modélisation pour générer trois interfaces significatives générant un flux thermique entre l'outil et le travail (épaulement de l'outil, surfaces latérales et inférieures du pion).

Dans ce chapitre, la modélisation et la simulation numérique du transfert de chaleur entre l'outil et les tôles à souder ont été réalisées. L'apport de chaleur provenant des trois surfaces,

- i) L'épaulement.
- ii) La surface latérale du pion.
- iii) La surface inférieure du pion.

L'adéquation et la précision du modèle peuvent être diagnostiquées par les résidus par rapport aux valeurs prédites et par des diagrammes de probabilité typiques. Les graphiques représentent les écarts entre les valeurs prédites et expérimentales. La présence d'un modèle régulier de résidus montre que le modèle est insuffisant. Pour un modèle adéquat et précis, les résidus dans un diagramme de probabilité typique sont disposés autour d'une ligne droite (Figure IV.1).





**Figure IV.1.** Schéma thermique des deux modèles (expérimental et théorique), (a) Apport de chaleur à partir de l'épaulement ( $Q_1$ ) pour les deux modèles, (b) Apport de chaleur à partir la surface latérale du pion ( $Q_2$ ) pour les deux modèles. et (c) Apport de chaleur à partir du fond du pion ( $Q_3$ ) pour les deux modèles.

### IV.2. Validation du modèle

On utilise un tableau pour organiser les différentes sources de variation et les statistiques associées.

**Tableau IV.1.** ANOVA pour l'apport de chaleur par l'épaule ( $Q_1$ )

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carrés moyens	$F_{abs}$
Régression (modèle)	$(k - 1): 5$	$SCEL = 2.5081$	$MCF = SCEL / (k - 1)$ 0.5016	$MCF / MCR$ 733.6107
Résidus	$(n - k): 3$	$SCER = 0.0021$	$MCR = SCER / (n - k)$ 0.00068	
Total	$(n - 1): 8$			

**Tableau IV.2.** ANOVA pour l'apport de chaleur de la broche de l'outil ( $Q_2$ )

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carrés moyens	$F_{abs}$
Régression (modèle)	$(k - 1): 5$	$SCEL = 11076$	$MCF = SCEL / (k - 1)$ 2215.3	$MCF / MCR$ 527.0349
Résidus	$(n - k): 3$	$SCER = 12.6099$	$MCR = SCER / (n - k)$ 4.2033	
Total	$(n - 1): 8$			

**Tableau IV.3.** ANOVA pour l'apport de chaleur du fond de l'outil ( $Q_3$ )

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carrés moyens	$F_{abs}$
Régression (modèle)	$(k - 1): 5$	$SCEL = 1391.8$	$MCF = SCEL / (k - 1)$ 278.3635	$MCF / MCR$ 4579.4
Résidus	$(n - k): 3$	$SCER = 0.1824$	$MCR = SCER / (n - k)$ 0.0608	
Total	$(n - 1): 8$			

La ligne droite confirme que le modèle est suffisant et précis. En outre, le test ANOVA confirme également que le modèle développé est adéquat. La valeur du test  $F_{crit}$ , prise à  $(k-1)$

## Chapitre IV: Interprétation des résultats de l'études expérimentales

---

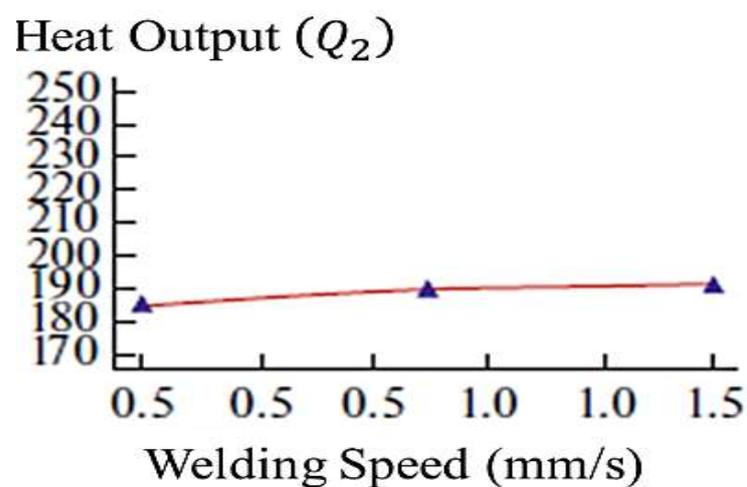
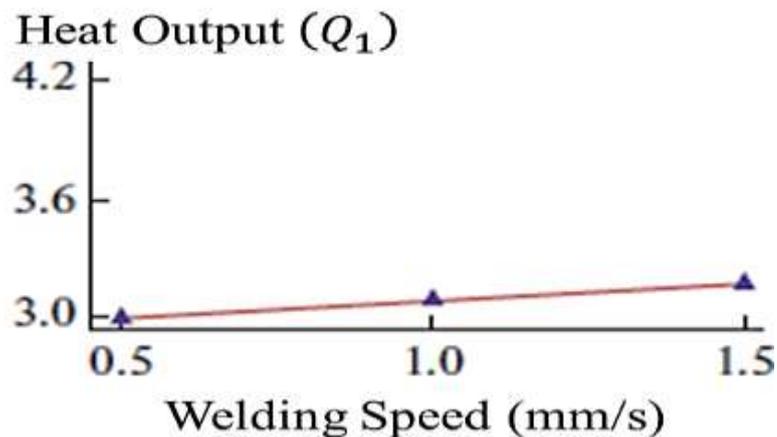
dans la table de Fischer, et la valeur calculée à partir du modèle ( $F_{abs}$ ). Le modèle est globalement significatif, et

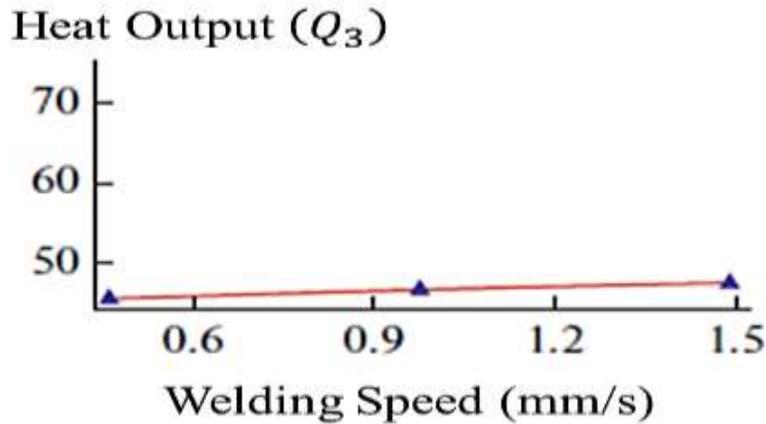
- Si  $F_{abs} > F_{crit}$ , ce modèle est globalement significatif .
- Si  $F_{abs} \gg F_{crit}$ . Cela signifie que le modèle est excellent.

Pour les degrés de liberté, nous extrayons une valeur  $F_{crit}$  égale à 9,01, donc les trois modèles (Tableaux IV.1, IV.2 et IV.3) sont excellents, comme le montre la Figure III.5, et les modèles expérimentaux sont identiques aux modèles théoriques.

### IV.3. Effet des paramètres principaux

#### a. Effet du facteur (WS) sur l'apport de chaleur des trois surfaces

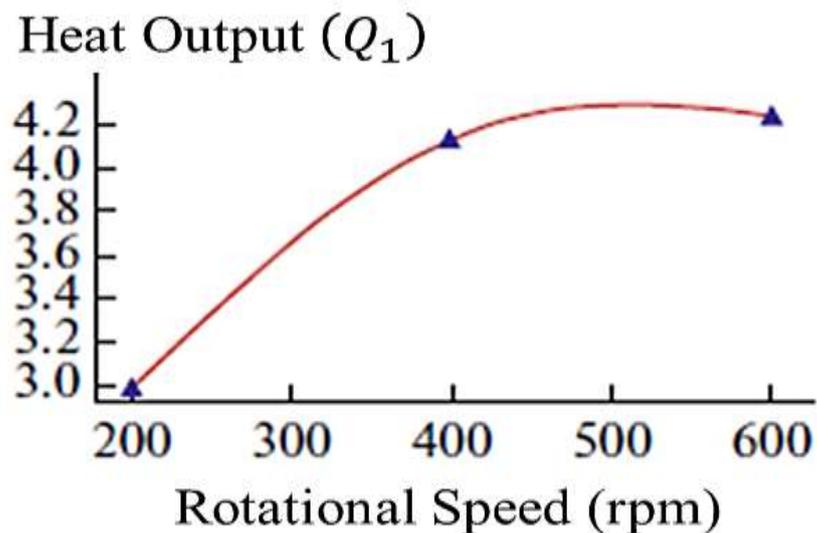


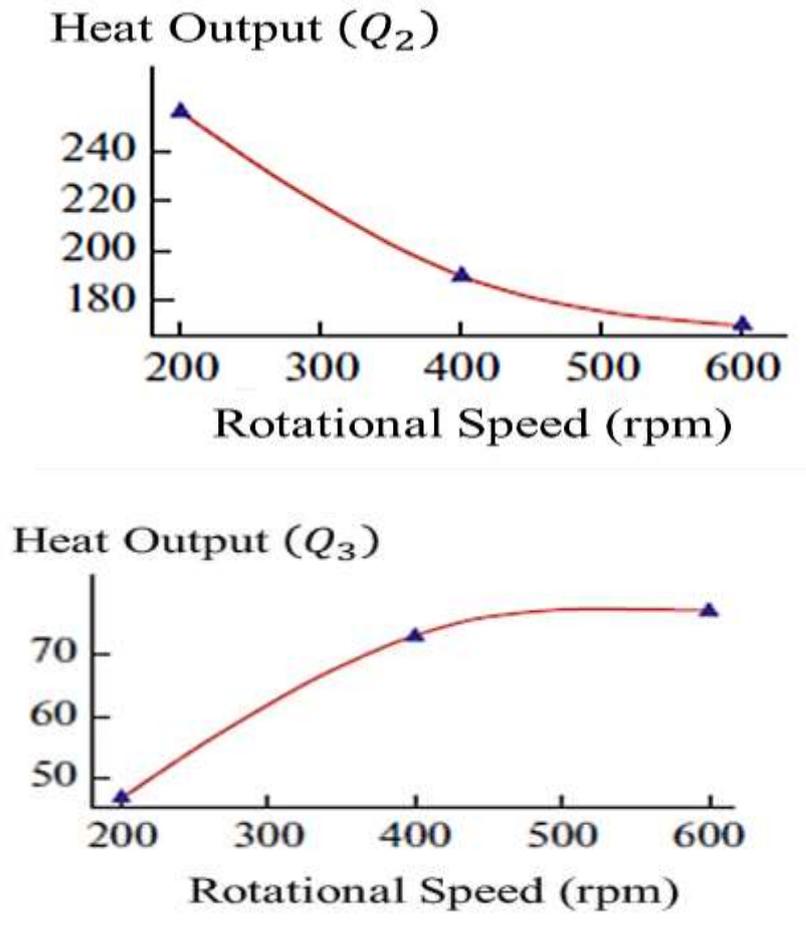


**Figure IV.2.** Représentation de l'effet du WS

Les tracés des effets principaux sont donnés à la Figure IV.2. On peut noter sur les graphiques que le WS maintient des effets presque similaires sur les trois surfaces de l'outil. Cela indique qu'une augmentation de la vitesse augmente le taux d'apport de chaleur, réduisant ainsi la température. De plus, les pentes des tracés individuels de la Figure IV.2 suggèrent également que le WS a un effet plus significatif sur l'apport de chaleur de l'épaule que sur les deux autres surfaces.

*b. Effet du facteur (TRS) sur l'apport de chaleur des trois surfaces*





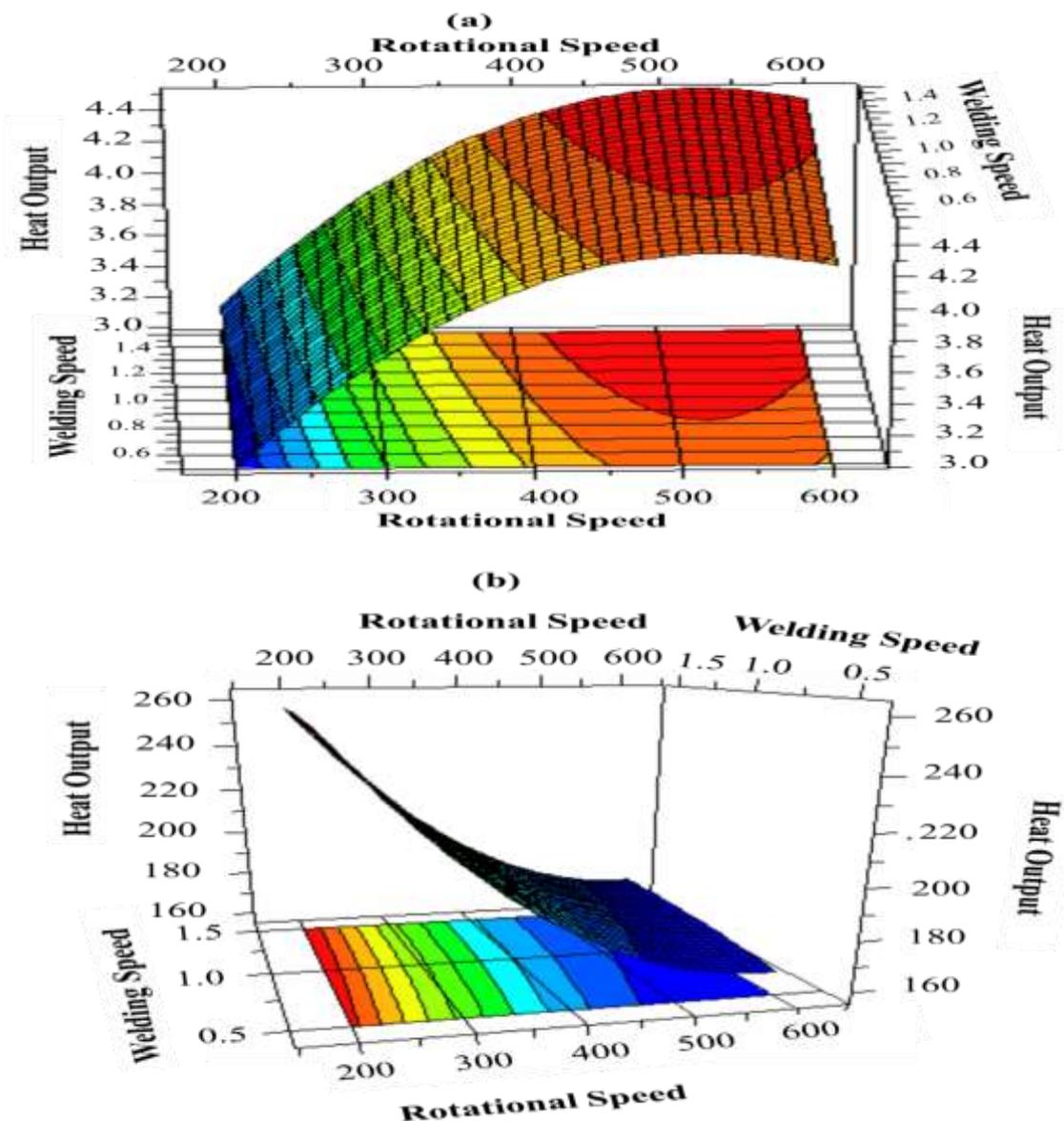
**Figure IV.3.** Représentation de l'effet du TRS

L'effet du *TRS*, comme le montre la Figure IV.3, montre que le tracé est similaire pour l'apport de chaleur de l'épaule et du fond de la broche. Alors que son effet est opposé à celui de l'apport de chaleur de la surface latérale de la tige, cette caractéristique particulière indique qu'une augmentation du *TRS* améliore l'apport de chaleur de l'épaule et du fond et de la surface inférieure de la tige. Cependant, l'apport de chaleur de la surface latérale de la broche diminue lorsque le *TRS* augmente. Cette particularité peut être attribuée au fait que le mouvement du matériau pendant l'action d'agitation de la tige suit une action de collage et de glissement ; avec l'augmentation du *TRS*, la fréquence du collage et du glissement augmente, et l'apport net de chaleur est réduit.

## Chapitre IV: Interprétation des résultats de l'études expérimentales

### c. Effet des interactions (WS et TRS) sur la réponse

L'effet de l'apport de chaleur dû à des facteurs secondaires (effet d'interaction) est basé sur la variation simultanée de deux facteurs dans la réponse. Leurs effets peuvent être similaires ou opposés en magnitude et en nature. Les résultats sont définis de deux manières : l'une dans l'espace à l'aide d'une surface spatiale courbe, et l'autre sous forme de cartes de contour à l'aide d'une projection de surface appelée courbe de réponse. Ces deux représentations combinées sont dérivées des équations (III.17), (III.18) et (III.19) et sont représentées dans les Figures IV.4 et IV.5.



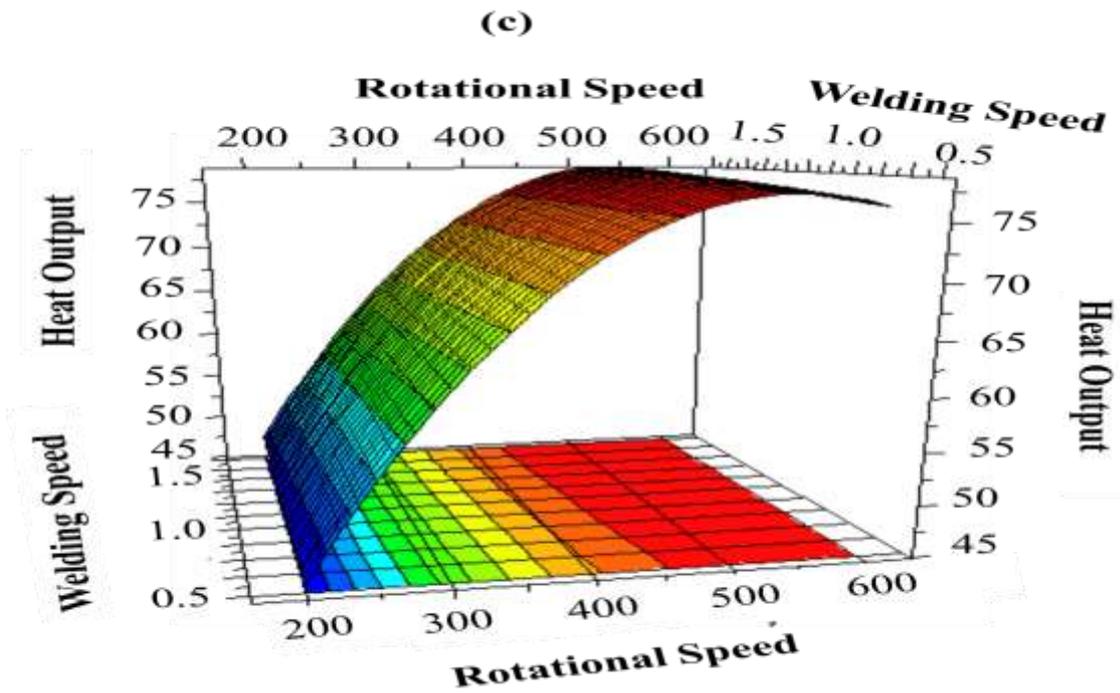
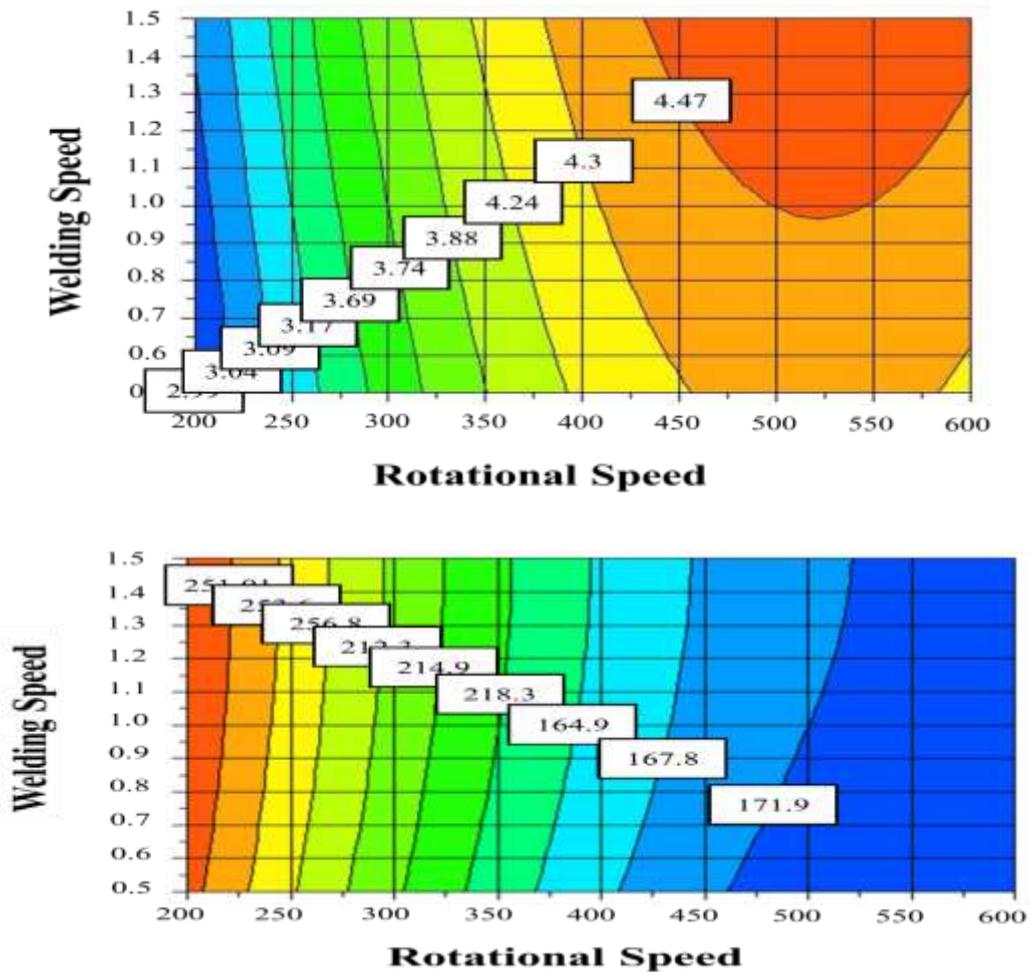
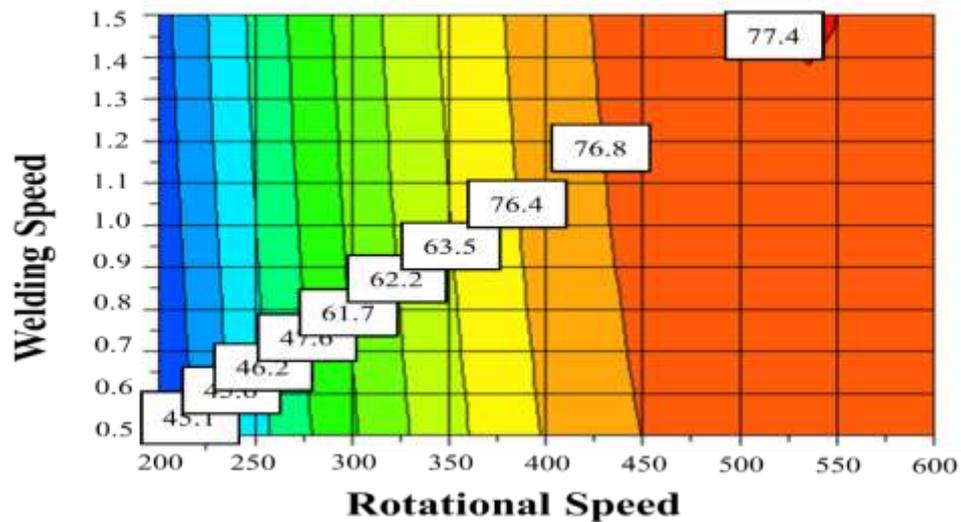


Figure IV.4. Variation de la réponse en fonction du WS et du TRS





**Figure IV.5.** Courbes de réponses en fonction de la variation de la réponse

La variation continue des données présentées dans le tracé de surface (Figure IV.4) et les cartes de contour (comme indiqué dans la Figure IV.5) peut être représentée, interprétée et analysée plus efficacement lorsque les données de ces tracés et cartes sont visualisées par les données tabulées.

**Tableau IV.4.** Résultats des différentes valeurs de paramètres pour l'apport de chaleur de l'épaulement ( $Q_I$ )

TRS (tr/min)	WS (0,5 mm/s)	WS (0,75 mm/s)	WS (1,5 mm/s)
200	2.98	3.04	3.16
300	3.69	3.74	3.88
600	4.23	4.30	4.47

Le Tableau IV.4 montre les valeurs de température à l'épaulement sous l'influence des différents paramètres. On peut noter que l'interaction donne la plus grande valeur d'apport de chaleur (c'est-à-dire environ 4.47) lorsque les deux vitesses sont à leur niveau le plus élevé, et que cette chaleur se réduit (à une valeur de 2.98) lorsque les deux vitesses sont à leur niveau le plus bas.

## Chapitre IV: Interprétation des résultats de l'études expérimentales

---

**Tableau IV.5.** Résultats des différentes valeurs de paramètres pour l'apport de chaleur de l'axe de l'outil ( $Q_2$ )

TRS (tr/min)	WS (0,5 mm/s)	WS (0,75 mm/s)	WS (1,5 mm/s)
200	251.01	253.6	256.8
300	212.3	214.9	218.3
600	164.9	167.8	171.9

En outre, le tableau IV.5 donne le taux d'apport de chaleur au niveau de la surface latérale de la broche. Les valeurs des données indiquent que l'apport de chaleur atteint sa plus grande valeur (c'est-à-dire 251.01 W) lorsque le **WS** est à son niveau le plus élevé et le **TRS** à son niveau le plus bas. La valeur de génération de chaleur atteint la valeur la plus faible (171.9 W) lorsque le TRS est à son niveau le plus élevé et que le **WS** est à son niveau le plus bas.

**Tableau IV.6.** Résultats des différentes valeurs de paramètres pour l'apport de chaleur du fond de l'outil ( $Q_3$ )

TRS (tr/min)	WS (0,5 mm/s)	WS (0,75 mm/s)	WS (1,5 mm/s)
200	45.6	46.2	47.6
300	61.7	62.2	63.4
600	76.4	76.8	77.4

Enfin, le Tableau IV.6 présente le pourcentage d'apport de chaleur à partir du bas de la broche, ou ce que l'on peut appeler l'immersion maximale de l'outil dans le matériau. Ce point est significatif pour le FSW car il est à l'origine de la conduction de la consolidation à la partie la plus froide des matériaux de base (c'est-à-dire "à l'arrière des deux feuilles à souder"). Ainsi, la combinaison de vitesses qui donne plus d'apport de chaleur dans cette zone sensible peut être considérée comme souhaitable. Ainsi, on peut noter que la combinaison de vitesses la plus favorable est celle qui donne plus d'apport de chaleur dans cette zone sensible, et ce à 600 tr/min **TRS** avec un **WS** de 1,5 mm/s. En outre, un examen des cartes de contour (c'est-à-dire la Figure IV.4(c)) révèle que la valeur la plus élevée pouvant être atteinte dans cette zone est proche de 78 pour une **TRS** de 525 tr/min et un **WS** de 1,5 mm/s.

### IV.4. Conclusion

Le facteur principal pour obtenir des joints soudés par friction-malaxage sains est un apport de chaleur adéquat. À son tour, la quantité d'apport de chaleur dépend de nombreuses caractéristiques, notamment l'épaisseur du matériau, la métallurgie des matériaux de base étant parmi les facteurs critiques. La modélisation et la simulation sont des outils essentiels qui peuvent être utilisés pour évaluer les résultats souhaités et économiser le matériel, le temps et les coûts associés aux expériences d'essai. Ce travail expérimental a permis de prédire l'apport de chaleur provenant de l'importante interface outil-métal de base. Sur la base de l'enquête, les conclusions suivantes ont été tirées :

- (1) Les modèles d'apport thermique pour les trois interfaces, c'est-à-dire l'épaulement de l'outil, la surface latérale de la broche et la face inférieure de la broche, ont été soumis à un test ANOVA. Ce test a prouvé que les modèles sont précis et fiables et peuvent aider à prévoir d'autres résultats dans le domaine d'étude.
- (2) Les données de l'étude et leurs résultats indiquent que l'effet du WS est faible sur l'apport de chaleur des trois interfaces, et que le TSR reste le principal facteur affectant la majeure partie de l'apport de chaleur.
- (3) Elles aussi montrent que l'épaulement de l'outil contribue entre 80 et 90 % de l'apport de chaleur, en fonction des conditions de soudage. Le reste de l'apport de chaleur est fourni par les surfaces de l'outil.

**Conclusion**

**Générale**

## Conclusion Générale

---

### Conclusion Générale

Dans cette étude, compréhension approfondie des relations entre les paramètres du processus et les résultats de soudage FSW a été faite, l'utilisation des méthodes des surfaces de réponse (RSM - Response Surface Methodology) dans la modélisation du soudage par friction malaxage. Cette méthode est particulièrement utile pour identifier les interactions entre différents facteurs opérationnels, comme la vitesse de rotation de l'outil et la vitesse d'avancement.

L'étude thermomécanique des procédés de soudage par friction-malaxage est essentielle pour exploiter pleinement les avantages de cette technologie et l'étendre à de nouvelles applications.

Les conclusions établies suite à cette étude sont les suivantes :

D'après l'expérience et l'analyse de la variance (ANOVA), on peut conclure que la vitesse de rotation et la vitesse de soudage ont une influence significative sur l'apport de chaleur des matériaux l'alliage d'aluminium Al-MgSi soudés par friction-malaxage.

La vitesse de rotation, la vitesse de déplacement sont des sources de température de soudage. L'étude révèle que l'influence du WS sur l'apport de chaleur aux trois interfaces est limitée, tandis que le TRS se distingue comme le facteur clé influençant majoritairement la quantité de chaleur apportée.

Trois interfaces essentielles pour le flux thermique entre l'outil et la pièce - l'épaule de l'outil, sa surface latérale et le dessous du goujon - ont été élaborées à l'aide de procédés de simulation et de modélisation dans cette étude. Il apparaît que, des trois interfaces, c'est l'épaule de l'outil qui génère le plus de chaleur, en raison de sa vaste surface en contact et frottant contre les pièces à souder.

Une augmentation de la vitesse de rotation et de la température de soudage entraîne une diminution correspondante de la vitesse de déplacement, révélant une relation de proportionnalité inverse. De plus, La température maximale a été obtenue avec vitesse de rotation égale à 600 tr/min et une vitesse de déplacement égale à 1.5 mm/s du matériau de base l'alliage d'aluminium Al-MgSi.

# Conclusion Générale

---

## Perspectives

Pour les travaux futurs, plusieurs directions de recherche pourraient ouvrir la voie à des innovations significatives dans le domaine du soudage par friction-malaxage, en améliorant la qualité, l'efficacité et la durabilité des processus de soudage, qui pourraient inclure :

- L'amélioration continue des modèles prédictifs à l'aide de la RSM permettra de mieux comprendre et d'optimiser les paramètres de soudage.
- Élargir l'application du FSW à des matériaux plus complexes et à des composites. Ceci inclut l'exploration de combinaisons de matériaux difficiles à souder par des méthodes traditionnelles.
- Ouvrant la voie à de nouvelles applications dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile et les énergies renouvelables.
- Poursuivre le développement de techniques de FSW plus respectueuses de l'environnement, en utilisant des matériaux plus écologiques.
- Applications dans de Nouveaux Secteurs comme les industries nucléaire, maritime et des infrastructures.
- Mettre l'accent sur la formation et l'éducation pour préparer une nouvelle génération d'ingénieurs et de techniciens qualifiés dans l'art du FSW, en intégrant des connaissances avancées sur la modélisation et la simulation du processus.

# **Bibliographie**

### Bibliographie

1. Saidoun, A., *Analyse numérique et expérimentale de l'interaction non-linéaire onde/fissure de fatigue par la méthode de génération d'harmoniques*, 2017, Université de Bordeaux.
2. Serri, J., et al. *Etude numérique du procédé de soudage par friction malaxage*. in *CFM 2007-18ème Congrès Français de Mécanique*. 2007. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
3. Elangovan, K. and V. Balasubramanian, *Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy*. *Materials Science and Engineering: A*, 2007. **459**(1-2): p. 7-18.
4. Sakthivel, T., G. Sengar, and J. Mukhopadhyay, *Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded aluminum*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009. **43**: p. 468-473.
5. Guedoiri, A., et al. *An analysis of boundary condition effects on the thermomechanical modeling of the FSW process*. in *AIP Conference Proceedings*. 2011. American Institute of Physics.
6. Jemal, N., *Contribution à la caractérisation thermique et mécanique de la zone soudée en FSW*, 2011, Arts et Métiers ParisTech.
7. He, X., F. Gu, and A. Ball, *A review of numerical analysis of friction stir welding*. *Progress in Materials Science*, 2014. **65**: p. 1-66.
8. Dialami, N., et al., *Challenges in thermo-mechanical analysis of friction stir welding processes*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017. **24**: p. 189-225.
9. Serier, M., et al., *Effect of FSW welding parameters on the tensile strength of aluminum alloys*. *Archives of Mechanical Technology and Materials*, 2019. **39**: p. 41-45.
10. Serier, M., M. Berrahou, and A. Chikh, *Parametric study of friction stir welding using elastic return*. *Archives of Mechanical Technology and Materials*, 2020. **40**.
11. Soori, M., M. Asmael, and D. Solyali, *Recent development in friction stir welding process*. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2021. **14**(1): p. 63-80.
12. Singh, U.K., A.K. Dubey, and A. Pandey. *Thermal analysis of friction stir welding for different tool geometries*. in *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering: Select Proceedings of ICAPIE 2019*. 2021. Springer.
13. Kumar, R., V. Upadhyay, and C. Sharma, *Effect of welding parameters in friction stir welding of dissimilar alloys AA2014 and AA7075*. *Materials Today: Proceedings*, 2021. **47**: p. 6551-6555.
14. Khalaf, H.I., et al., *Effects of underwater friction stir welding heat generation on residual stress of AA6068-T6 aluminum alloy*. *Materials*, 2022. **15**(6): p. 2223.
15. Leon, S.L.J., et al., *Analytical and numerical thermal analysis on friction stir welding using polygonal tool pin*. *IIUM Engineering Journal*, 2021. **22**(2): p. 352-363.
16. Al-Sabur, R., *Tensile strength prediction of aluminium alloys welded by FSW using response surface methodology—Comparative review*. *Materials Today: Proceedings*, 2021. **45**: p. 4504-4510.
17. Sun, Z., P. Liu, and X. Yu, *Thermomechanical analysis of friction stir welding using a new velocity-based model for tool-workpiece interaction*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022. **121**(11-12): p. 7341-7357.
18. Khalaf, H.I., et al., *The Effects of Pin Profile on HDPE Thermomechanical Phenomena during FSW*. *Polymers*, 2022. **14**(21): p. 4632.

## Bibliographie

---

19. Asmare, A., R. Al-Sabur, and E. Messele, *Experimental investigation of friction stir welding on 6061-t6 aluminum alloy using taguchi-based gra*. *Metals*, 2020. **10**(11): p. 1480.
20. Boukraa, M., et al., *Thermal analysis of the friction stir welding process based on boundary conditions and operating parameters*. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2021. **70**(4).
21. Serier, M., et al., *Parametric studies of friction stir welding with tool using a vibrating shoulder*. *Materials Today: Proceedings*, 2022. **62**: p. 70-76.
22. Veljić, D.M., et al., *Thermo-mechanical analysis of linear welding stage in friction stir welding Influence of Welding Parameters*. *Thermal Science*, 2022. **26**(3A): p. 2125-2134.
23. Melaku, L.E., et al., *Optimization and thermal analysis of friction stir welding on AA6061 aluminum alloys*. *Materials Today: Proceedings*, 2022. **65**: p. 3348-3356.
24. Chalurkar, C. and D.K. Shukla. *Temperature Analysis of Friction Stir Welding (AA6061-T6) with Coupled Eulerian-Lagrangian Approach*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022. IOP Publishing.
25. Mishin, V., et al., *Numerical simulation of the thermo-mechanical behavior of 6061 aluminum alloy during friction-stir welding*. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022. **6**(4): p. 68.
26. Salih, O.S., H. Ou, and W. Sun, *Heat generation, plastic deformation and residual stresses in friction stir welding of aluminium alloy*. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023. **238**: p. 107827.
27. Sharma, Y., et al., *Analysis of friction stir welds using numerical modelling approach: a comprehensive review*. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2023: p. 1-14.
28. Singh, R. and Y. Kumar, *Effect of cooling tank embedded fixture design on the thermal analysis of friction stir welded aluminum alloy*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023. **32**(16): p. 7215-7224.
29. Thomas, W., et al., *Friction stir butt welding, international patent application no. PCT/GB92 Patent application, 1991(9125978.8)*.
30. Mishra, R.S. and Z. Ma, *Friction stir welding and processing*. *Materials science and engineering: R: reports*, 2005. **50**(1-2): p. 1-78.
31. Zimmer, S., *Contribution a l'industrialisation du soudage par friction malaxage*, 2009, Paris, ENSAM.
32. Cao, X. and M. Jahazi, *Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy*. *Materials & Design*, 2011. **32**(1): p. 1-11.
33. Singh, K., G. Singh, and H. Singh, *Investigation on the microstructure and mechanical properties of a dissimilar friction stir welded joint of magnesium alloys*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2019. **233**(12): p. 2444-2454.
34. Guerin, B.J.P., *Soudage d'alliages d'aluminium par la technologie Friction Stir Welding Bobbin Tool*, 2010, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
35. Kitamura, K., et al., *Flexible control of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded Ti-6Al-4V joints*. *Materials & Design (1980-2015)*, 2013. **46**: p. 348-354.
36. Buffa, G., L. Fratini, and F. Micari, *Mechanical and microstructural properties prediction by artificial neural networks in FSW processes of dual phase titanium alloys*. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012. **14**(3): p. 289-296.

## Bibliographie

---

37. Sharifitabar, M. and H. Nami, *Microstructures of dissimilar friction stir welded joints between 2024-T4 aluminum alloy and Al/Mg<sub>2</sub>Si metal matrix cast composite*. Composites Part B: Engineering, 2011. **42**(7): p. 2004-2012.
38. Bozkurt, Y., H. Uzun, and S. Salman, *Microstructure and mechanical properties of friction stir welded particulate reinforced AA2124/SiC/25p-T4 composite*. Journal of Composite Materials, 2011. **45**(21): p. 2237-2245.
39. Threadgill, P., et al., *Friction stir welding of aluminium alloys*. International Materials Reviews, 2009. **54**(2): p. 49-93.
40. Shercliff, H.R., et al., *Microstructural modelling in friction stir welding of 2000 series aluminium alloys*. Mechanics & Industry, 2005. **6**(1): p. 25-35.
41. Reynolds, A.P., W. Lockwood, and T. Seidel. *Processing-property correlation in friction stir welds*. in *Materials science forum*. 2000. Trans Tech Publ.
42. Guedoiri, A., *Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du soudage par friction et malaxage*, 2012, Paris, ENSAM.
43. Unités, S.D., *ÉTUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DES MECANISMES THERMIQUES LORS DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE*.
44. Han, Y., et al., *Microstructure and mechanical properties of electrically assisted friction stir welded AZ31B alloy joints*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. **43**: p. 26-34.
45. Liu, X., S. Lan, and J. Ni, *Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel*. Journal of materials processing technology, 2015. **219**: p. 112-123.
46. Chen, S., et al., *Mechanical properties of electric assisted friction stir welded 2219 aluminum alloy*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. **44**: p. 197-206.
47. Sajed, M., J.W.G. Guerrero, and H.A. Derazkola, *A Literature Survey on Electrical-Current-Assisted Friction Stir Welding*. Applied Sciences, 2023. **13**(3): p. 1563.
48. Ferrando, W.A., *The concept of electrically assisted friction stir welding (EAFSW) and application to the processing of various metals*. Naval Surface Warfare Center, 2008.
49. Chen, S., et al., *Microstructure and mechanical properties of AZ31B Mg alloy fabricated by friction stir welding with pulse current*. Journal of Manufacturing Processes, 2021. **71**: p. 317-328.
50. Mandache, C., et al., *Pulsed eddy current testing of friction stir welds*. Materials Evaluation, 2008. **66**(4).
51. Balasubramanian, V., V. Ravisankar, and G. Madhusudhan Reddy, *Effect of pulsed current welding on mechanical properties of high strength aluminum alloy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. **36**: p. 254-262.
52. Wang, L., et al., *Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Mg Alloy with Cu Interlayer Fabricated by Pulse Current Assisted Friction Stir Welding*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023. **32**(6): p. 2661-2675.
53. Potluri, N., et al., *Studies on weld metal characteristics and their influence on tensile and fatigue properties of pulsed-current GMA welded Al-Zn-Mg alloy*. Welding journal, 1996. **75**(2).
54. SHINODA, T. and Y. UENO, *Effect of pulsed welding current on solidification cracking in austenitic stainless steel welds*. Transactions of the Japan Welding Society, 1990. **21**(1): p. 18-23.
55. Li, G., et al., *Effect of self-reacting friction stir welding on microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy joints*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. **37**: p. 1-10.

## Bibliographie

---

56. Liu, H., J. Hou, and H. Guo, *Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy*. *Materials & Design*, 2013. **50**: p. 872-878.
57. Zhou, L., et al., *Microstructural characteristics and mechanical properties of Al–Mg–Si alloy self-reacting friction stir welded joints*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017. **22**(5): p. 438-445.
58. Li, G., et al., *Microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded AA2219-T87 aluminium alloy*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2020. **25**(2): p. 142-149.
59. Zhou, L., et al., *Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded Al-Mg-Si alloy*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017. **89**: p. 3509-3516.
60. Al-Sabur, R.K. and A.K. Jassim. *Friction stir spot welding applied to weld dissimilar metals of AA1100 Al-alloy and C11000 copper*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
61. Sanusi, K. and E.T. Akinlabi. *Material characterization of dissimilar friction stir spot welded Aluminium and Copper alloy*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. IOP Publishing.
62. Shen, Z., Y. Ding, and A.P. Gerlich, *Advances in friction stir spot welding*. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020. **45**(6): p. 457-534.
63. Pan, T.-Y., *Friction stir spot welding (FSSW)-a literature review*. 2007.
64. Yang, X., T. Fu, and W. Li, *Friction stir spot welding: a review on joint macro-and microstructure, property, and process modelling*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014. **2014**.
65. Fujimoto, M., et al., *Microstructural analysis of stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008. **13**(7): p. 663-670.
66. Zimmer, S., et al. *FSW: Un procédé de soudage pour les alliages d'aluminium de fonderie*. in *11ème Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne*. 2009.
67. Tongne, A., *Étude expérimentale et numérique du procédé de soudage FSW (Friction Stir Welding). Analyse microstructurale et modélisation thermomécanique des conditions de contact outil/matière transitoires*, 2014, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
68. Dardouri, F., *Dispositif d'assistance associé à des robots manipulateurs utilisés dans des procédés de fabrication/FSW*, 2018, Paris, ENSAM.
69. Muthukumar, S. and S. Mukherjee, *Multi-layered metal flow and formation of onion rings in friction stir welds*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008. **38**: p. 68-73.
70. Moustafa, B., et al. *Simulation numérique du transfert de chaleur pendant le procédé de soudage par friction malaxage durant deux phases*. in *Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Métaux, IC-WNDT-MI'14*. 2014. Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle (CSC).
71. HELAL, Y., *L'effet de soudage par friction sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier*, 2017, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
72. Aval, H.J., *Influences of pin profile on the mechanical and microstructural behaviors in dissimilar friction stir welded AA6082–AA7075 butt joint*. *Materials & Design*, 2015. **67**: p. 413-421.

## Bibliographie

---

73. Maneiah, D., et al., *Process parameters optimization of friction stir welding for optimum tensile strength in Al 6061-T6 alloy butt welded joints*. Materials Today: Proceedings, 2020. **27**: p. 904-908.
74. Dawes, C., *Friction Stir Joining of Aluminium Alloy*. Welding Journal, 1995. **36**.
75. Kassab, R.K., *Modélisation par la méthode des éléments finis des distorsion dues au soudage d'un joint en T*, 2007, École de technologie supérieure.
76. Hellier, A., et al., *Effect of ultrasonic peening on fatigue crack propagation from a weld toe*. 2016.
77. Carvill, J., *Mechanical engineer's data handbook*1994: Butterworth-Heinemann.
78. BOUKHARI, D., *ANALYSES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES DE L'EFFET D'ANGLE DE SOUDAGE FSW DES MATERIAUX POLYMERES CAS DU PEHD*, Université de Mascara-Mustapha Stambouli.
79. Zimmer, S., et al., *Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010. **47**: p. 201-215.
80. Nyang'au, M.G., A.M. Muumbo, and F.N. Mutua, *A review of the application of friction stir welding on hard-to-weld materials*. African Journal of Engineering Research, 2024. **12**(1): p. 1-11.
81. Zhou, Z., et al., *Corrosion and protection of friction stir welding of magnesium alloy*. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2024. **71**(1): p. 47-54.
82. Jiang, Y., et al., *Vacuum laser beam welding of AZ31 magnesium alloy: Weld formability, microstructure and mechanical properties*. Optics & Laser Technology, 2024. **169**: p. 110115.
83. Vyskoč, M., et al., *Microstructure–Properties relationship in laser-welded AZ31B magnesium alloy*. Materials Characterization, 2024: p. 113664.
84. Jha, R.K., K.V. Reddy, and S. Pal, *A molecular dynamic simulation-based study on nanoscale friction stir welding between copper and aluminium*. Molecular Simulation, 2024. **50**(2): p. 117-128.
85. Liu, F., et al., *Studies on thermal stability, softening behavior and mechanism of an ADS copper alloy at elevated temperatures*. Journal of Materials Science & Technology, 2024. **186**: p. 79-90.
86. Li, J., et al., *Microstructure performance and Nano-Effect of laser alloying composites with Multi-Phase on TA1 titanium alloy*. Optics & Laser Technology, 2024. **169**: p. 109975.
87. Deconinck, L., T. Depover, and K. Verbeken, *Characterisation of hydride formation in as-built and heat treated laser powder bed fused Ti-6Al-4V*. Journal of Alloys and Compounds, 2024. **972**: p. 172859.
88. Ragab, M., et al., *Numerical and experimental study of underwater friction stir welding of 1Cr11Ni2W2MoV heat-resistant stainless steel*. Journal of Materials Research and Technology, 2024.
89. Khan, F., et al., *Sound dissimilar linear friction welding of A7075-T6 Al and mild steel by simultaneous interfacial deformation using higher forging speed*. Journal of Manufacturing Processes, 2024. **109**: p. 512-523.
90. Işıtan, A., S. Aytakin, and V. Onar, *Enhancing the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Aluminum Matrix Composites Through Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforcement via CMT and PMC Welding*. International Journal of Metalcasting, 2024: p. 1-14.
91. Geng, P., et al., *Effect of tool revolutionary pitch on heat transfer and material flow in Al/steel friction stir lap welding*. Journal of materials processing technology, 2024: p. 118306.

## Bibliographie

---

92. Chen, Z., et al., *Numerical and experimental investigation on intermetallic compounds formation in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding of dissimilar Al/Mg alloys*. Journal of Alloys and Compounds, 2024: p. 173426.
93. Qu L, M.N., Xiao X, Zhang K, Li H., *Microstructure and Properties of Nonlinear Lap Joint of 6061 Aluminum Alloy by Friction Stir Welding*. Metals., 2023. **13(8):1494**.
94. Patel, M.M. and V.J. Badheka, *A review on friction stir welding (FSW) process for dissimilar aluminium to steel metal systems*. Welding International, 2024. **38(2)**: p. 91-115.
95. Aval, H.J. and I. Galvão, *Characterization of friction stir welded Al-4Cu-Mg alloy/Al-16Si-4Cu-10SiC composite joint*. Journal of Advanced Joining Processes, 2024: p. 100192.
96. Ambrosio, D., et al., *Extremely thin intermetallic layer in dissimilar AA6061-T6 and mild steel friction stir lap welding using a hemispherical tool*. Scientific Reports, 2024. **14(1)**: p. 1718.
97. Gemme, F., *Modélisation numérique des phénomènes physiques du soudage par friction-malaxage et comportement en fatigue de joints soudés en aluminium 7075-T6*, 2011, École Polytechnique de Montréal.
98. Demouche, M., *Etude de l'influence des paramètres de soudage par friction sur la qualité des joints soudés*, 2020.
99. Proton, V., *Caractérisation et compréhension du comportement en corrosion de structures en alliage d'aluminium-cuivre-lithium 2050 assemblées par Friction Stir Welding (FSW)*, 2012.
100. Schneider, J. and A. Nunes Jr. *Thermo-mechanical processing in friction stir welds*. in *TMS (The Mineral, Metals, and Materials Society) 2003, 132nd Annual Meeting and Exhibition*. 2002.
101. Le Jolu, T., *Étude de l'influence des défauts de soudage sur le comportement plastique et la durée de vie en fatigue de soudures par friction-malaxage d'un alliage Al-Cu-Li*, 2011, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
102. Tchein, G.J., *Étude des couplages thermomécaniques et microstructuraux d'un alliage de titane au cours du soudage FSW*, 2018, Bordeaux.
103. Lorrain, O., *Analyses expérimentales et numériques du procédé de soudage par friction malaxage fsw*, 2010, Arts et Métiers ParisTech.
104. Liu, H., L. Zhou, and Q. Liu, *Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti-6Al-4V titanium alloy*. Materials & Design, 2010. **31(3)**: p. 1650-1655.
105. Cavaliere, P., A. Squillace, and F. Panella, *Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding*. Journal of materials processing technology, 2008. **200(1-3)**: p. 364-372.
106. Yan, J., M.A. Sutton, and A.P. Reynolds, *Process-structure-property relationships for nugget and heat affected zone regions of AA2524-T351 friction stir welds*. Science and Technology of Welding and Joining, 2005. **10(6)**: p. 725-736.
107. Cavaliere, P., et al., *Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by friction stir welding*. Journal of materials processing technology, 2006. **180(1-3)**: p. 263-270.
108. Reynolds, A.P., et al., *Relationships between weld parameters, hardness distribution and temperature history in alloy 7050 friction stir welds*. Science and Technology of Welding and Joining, 2005. **10(2)**: p. 190-199.
109. Vivekanandan, P., et al., *The experimental analysis of friction stir welding on aluminium composites*. International Journal of Metallurgical Engineering, 2012. **1(4)**: p. 60-65.

## Bibliographie

---

110. Kim, Y., et al., *Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2006. **415**(1-2): p. 250-254.
111. De Backer, J., *Feedback control of robotic friction stir welding*, 2014, University West.
112. Nunes, A., *Heat input and temperature distribution in friction stir welding*. Journal of materials processing & manufacturing science, 1998. **7**: p. 163.
113. Chibane, H., *Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire: application aux matériaux métalliques et composites*, 2013, Tours.
114. Idris, D.Y.; Available from: <https://elearning.univ-bejaia.dz/mod/resource/view.php?id=46601&forceview=1>.
115. Triboulet, P., *Notions de bases sur les plans d'expériences*. Chalon sur Saône, 2008.
116. Goupy, J., *Plans d'expériences* 2006: Ed. Techniques Ingénieur.
117. Wahdame, B., *Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences*, 2006, Université de Franche-Comté; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
118. DAAS, M.S., *Plans d'expériences*.
119. Goupy, J. and L. Creighton, *Introduction aux plans d'expériences—3e édition. Technique et ingénierie, serie conception*. L'usine nouvelle-Dunod, 2006: p. 179-206.
120. Idris, Y., *Les plans d'expériences initiation à la construction et à l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré*. Notes de Cours, Département de Génie des Procédés, Faculté de Technologie, Université A. MIRA-Bejaia, 2015.
121. Lehembre, B., *Le soudeur Nathan*. Paris ed 1997.
122. Mezrag, B., *Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT*, 2015, Université Montpellier; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie).
123. Verduzco Juárez, J., et al., *Effect of modified pin profile and process parameters on the friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6*. Advances in Materials Science and Engineering, 2016. **2016**.
124. Hamilton, C., S. Dymek, and A. Sommers, *A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys*. International journal of machine tools and manufacture, 2008. **48**(10): p. 1120-1130.
125. Louvet, F. and L. Delplanque, *Design of experiments: the French touch*. Orléans: Experimentique, 2005.

# **Annexes**

### Composition chimique :

Suivant : EN 573-3:2009(F)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	remarqs	Autres		Aluminium min
												Chacun	total	
0,30 - 0,60	0,10 - 0,30	0,10	0,1	0,35 - 0,60	0,05	...	0,15	0,1	...	...	...	0,05	0,15	Reste

### Propriétés physiques typiques :

Suivant : "mill products general properties" Pechiney

1MPa = 1N/mm<sup>2</sup>

Masse volumique g/cm <sup>3</sup> .....	2,7	Coefficient de Poisson .....	0,33
Intervalle de fusion °C .....	615 - 655	Conductivité thermique (0 to 100°C)- W/m °C (Etat T5) .....	200
Coefficient de dilatation linéique (0 to 100°C)-°C-1 x 10(6) .....	23,4	Résistivité at 20°C - μΩ cm (Etat T5) .....	3,3
Modulus d'élasticité MPa (average) .....	69 500	Capacité thermique massique (0 to 100°C) J/kg °C .....	945

### Aptitudes technologiques :

Suivant : "mill products general properties" Pechiney

(A)-Très bon (B)-Bon (C)-Acceptable (D)-Mauvais ou à éviter

Soudage	Emboutissage profond	Comportement naturel	Anodisation
Par faisceau d'électron	Etat recuit	Aux agents atmosphériques	De protection
A l'arc sous argon (TIG or MIG)	Etat 1/2 dur H116/H32	En milieu marin	Brillante
Par résistance	Etat 4/4 dur	<b>Usinage Etat T5</b>	Anodisation dure
Par soudage-brasage	Repoussage Etat 0	Fragmentation du copeau	

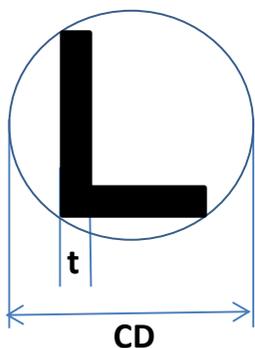
### Tolérances Largeur, profondeur ou largeur sur plats

Suivant : EN 755-9 2008 (F)

Extraits de la norme , consulter la norme pour avoir les spécifications complètes

Dimensions en millimètres

#### PROLIFS STANDARDS :



largeur sur plats		Tolérances sur plats pour le cercle circonscrit CD a) b)				
Supérieur à	Inférieur ou égal à	CD <= 100	100 < CD <= 200	200 < CD <= 300	300 < CD <= 500	500 < CD <= 800
...	10	± 0,25	± 0,30	± 0,35	± 0,40	± 0,50
10	25	± 0,30	± 0,40	± 0,50	± 0,60	± 0,70
25	50	± 0,50	± 0,60	± 0,80	± 0,90	± 1,00
50	100	± 0,70	± 0,90	± 1,10	± 1,30	± 1,50
100	150	...	± 1,10	± 1,30	± 1,50	± 1,70
150	200	...	± 1,30	± 1,50	± 1,80	± 2,00
200	300	...	...	± 1,70	± 2,10	± 2,40
300	450	...	...	...	± 2,80	± 3,00
450	600	...	...	...	± 3,80	± 4,20
600	800	...	...	...	...	± 5,00

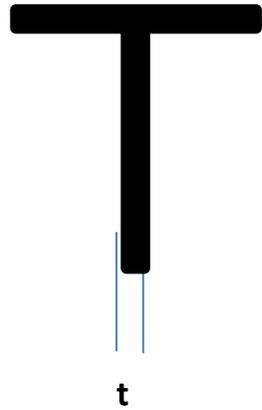
Groupe d'alliage I : 6060, 6005 (autres alliages consulter les normes)

(a) : Ces tolérances ne s'appliquent pas aux états O et Tx510. Pour ces états, les tolérances doivent faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'acheteur.

(b) Tolérances générales, voir normes pour tolérances spécifiques (comme sur les extrémité ouvertes auxquelles il faut rajouter des données)

**Tolérances épaisseurs :**

Alliages du groupe I : AW-6060, AW-6005 (autres alliages voir norme)



Suivant : EN 755-9 2008 (F)

Extraits de la norme , consulter la norme pour avoir les spécifications complètes

Dimensions en millimètres

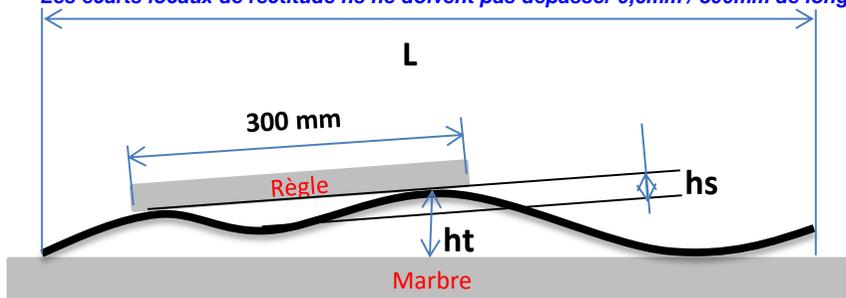
Epaisseur de paroi nominale t		Tolérances sur épaisseur de parois pour cercle circonscrit CD	
		CD <= 100	100 < CD <= 300
Supérieure à	Inférieure ou égale à		
...	1,5	± 0,20	± 0,30
1,5	3	± 0,25	± 0,40
3	6	± 0,40	± 0,60
6	10	± 0,60	± 0,80
10	15	± 0,80	± 1,00
15	20	± 1,20	± 1,50
20	30	± 1,50	± 1,80
30	40	...	± 2,00
40	50	...	...

**LUTIM**

**Tolérances de rectitude :**

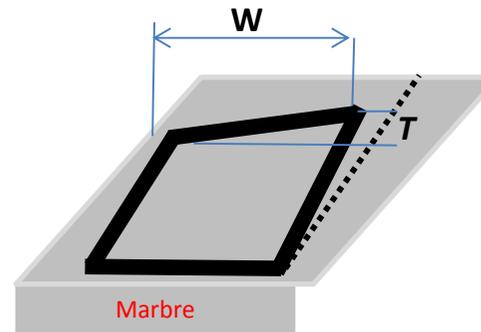
La tolérance de rectitude ht ne doit pas dépasser 1,5 mm / m de longueur

Les écarts locaux de rectitude hs ne doivent pas dépasser 0,6mm / 300mm de long



**Tolérances de vrillage :**

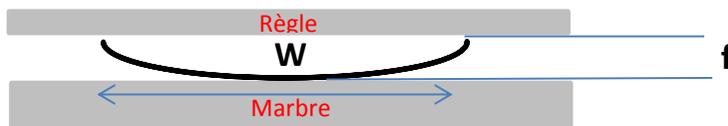
La tolérance de rectitude ht ne doit pas dépasser 1,5 mm



Dimensions en millimètres

Largeur W		Tolérances de vrillage T		
		Sur une longueur de 1000 mm	Sur longueur Totale	
> à	<= à		<= à 6000 mm	> à 6000 mm
...	30	1,2	2,5	3,0
30	50	1,5	3,0	4,0
50	100	2,0	3,5	5,0
100	200	2,5	5,0	7,0
200	300	2,5	6,0	8,0
300	450	3,0	8,0	...

**Tolérances de concavité - convexité :**



Dimensions en millimètres

Largeur W		Ecart maximal admissible f
> à	< ou = à	
...	30	0,20
30	60	0,30
60	100	0,40
100	150	0,60
150	200	0,80
200	300	1,20
300	400	1,60
400	500	2,00

Profil filé

Produit	Etat métallurgique	Epaisseur paroi t mm	CARACTERISTIQUES MECANQUES							Dureté
			Rm-UTS min (Mpa)	Rm-UTS max (Mpa)	Rp0,2MPa-0,2%ps	A% min	A% 50mm			HBW *
Profil filé 6060	T4 c)	<= 25	120	'''	60	16	14			50
Profil filé 6060	T5	<= 5	160	'''	120	8	6			60
Profil filé 6060	T5	5 < t <= 25	140	'''	100	8	6			60
Profil filé 6060	T6 c)	<= 3	190	'''	150	8	6			70
Profil filé 6060	T6 c)	3 < t <= 25	170	'''	140	8	6			70
Profil filé 6060	T64 c)d)	<= 15	180	'''	120	12	10			60
Profil filé 6060	T66 c)	<= 3	215	'''	160	8	6			75
Profil filé 6060	T66 c)	3 < t <= 25	195	'''	150	8	6			75

c) Les caractéristiques peuvent être obtenues par trempe sur presse

d) Qualité du pliage

QUANTILES D'ORDRE 0.95 DE LA LOI DE FISHER

Degrés de liberté du numérateur sur la première ligne  
 Degrés de liberté du dénominateur sur la colonne de gauche

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40
3	10.13	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993
70	3.978	3.128	2.736	2.503	2.346	2.231	2.143	2.074	2.017	1.969
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951
90	3.947	3.098	2.706	2.473	2.316	2.201	2.113	2.043	1.986	1.938
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927
150	3.904	3.056	2.665	2.432	2.274	2.160	2.071	2.001	1.943	1.894
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.259	2.144	2.056	1.985	1.927	1.878
400	3.865	3.018	2.627	2.394	2.237	2.121	2.032	1.962	1.903	1.854

QUANTILES D'ORDRE 0.95 DE LA LOI DE FISHER

Degrés de liberté du numérateur sur la première ligne  
 Degrés de liberté du dénominateur sur la colonne de gauche

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	243.0	243.9	244.7	245.4	245.9	246.5	246.9	247.3	247.7	248.0
2	19.40	19.41	19.42	19.42	19.43	19.43	19.44	19.44	19.44	19.45
3	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.692	8.683	8.675	8.667	8.660
4	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.844	5.832	5.821	5.811	5.803
5	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.604	4.590	4.579	4.568	4.558
6	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.922	3.908	3.896	3.884	3.874
7	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.494	3.480	3.467	3.455	3.445
8	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.202	3.187	3.173	3.161	3.150
9	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.989	2.974	2.960	2.948	2.936
10	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.828	2.812	2.798	2.785	2.774
11	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.701	2.685	2.671	2.658	2.646
12	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.599	2.583	2.568	2.555	2.544
13	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.515	2.499	2.484	2.471	2.459
14	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.445	2.428	2.413	2.400	2.388
15	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.385	2.368	2.353	2.340	2.328
16	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.333	2.317	2.302	2.288	2.276
17	2.413	2.381	2.353	2.329	2.308	2.289	2.272	2.257	2.243	2.230
18	2.374	2.342	2.314	2.290	2.269	2.250	2.233	2.217	2.203	2.191
19	2.340	2.308	2.280	2.256	2.234	2.215	2.198	2.182	2.168	2.155
20	2.310	2.278	2.250	2.225	2.203	2.184	2.167	2.151	2.137	2.124
21	2.283	2.250	2.222	2.197	2.176	2.156	2.139	2.123	2.109	2.096
22	2.259	2.226	2.198	2.173	2.151	2.131	2.114	2.098	2.084	2.071
23	2.236	2.204	2.175	2.150	2.128	2.109	2.091	2.075	2.061	2.048
24	2.216	2.183	2.155	2.130	2.108	2.088	2.070	2.054	2.040	2.027
25	2.198	2.165	2.136	2.111	2.089	2.069	2.051	2.035	2.021	2.007
26	2.181	2.148	2.119	2.094	2.072	2.052	2.034	2.018	2.003	1.990
27	2.166	2.132	2.103	2.078	2.056	2.036	2.018	2.002	1.987	1.974
28	2.151	2.118	2.089	2.064	2.041	2.021	2.003	1.987	1.972	1.959
29	2.138	2.104	2.075	2.050	2.027	2.007	1.989	1.973	1.958	1.945
30	2.126	2.092	2.063	2.037	2.015	1.995	1.976	1.960	1.945	1.932
40	2.038	2.003	1.974	1.948	1.924	1.904	1.885	1.868	1.853	1.839
50	1.986	1.952	1.921	1.895	1.871	1.850	1.831	1.814	1.798	1.784
60	1.952	1.917	1.887	1.860	1.836	1.815	1.796	1.778	1.763	1.748
70	1.928	1.893	1.863	1.836	1.812	1.790	1.771	1.753	1.737	1.722
80	1.910	1.875	1.845	1.817	1.793	1.772	1.752	1.734	1.718	1.703
90	1.897	1.861	1.830	1.803	1.779	1.757	1.737	1.720	1.703	1.688
100	1.886	1.850	1.819	1.792	1.768	1.746	1.726	1.708	1.691	1.676
150	1.853	1.817	1.786	1.758	1.734	1.711	1.691	1.673	1.656	1.641
200	1.837	1.801	1.769	1.742	1.717	1.694	1.674	1.656	1.639	1.623
400	1.813	1.776	1.745	1.717	1.691	1.669	1.648	1.630	1.613	1.597

QUANTILES D'ORDRE 0.95 DE LA LOI DE FISHER

Degrés de liberté du numérateur sur la première ligne  
 Degrés de liberté du dénominateur sur la colonne de gauche

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	248.3	248.6	248.8	249.1	249.3	249.5	249.6	249.8	250.0	250.1
2	19.45	19.45	19.45	19.45	19.46	19.46	19.46	19.46	19.46	19.46
3	8.654	8.648	8.643	8.639	8.634	8.630	8.626	8.623	8.620	8.617
4	5.795	5.787	5.781	5.774	5.769	5.763	5.759	5.754	5.750	5.746
5	4.549	4.541	4.534	4.527	4.521	4.515	4.510	4.505	4.500	4.496
6	3.865	3.856	3.849	3.841	3.835	3.829	3.823	3.818	3.813	3.808
7	3.435	3.426	3.418	3.410	3.404	3.397	3.391	3.386	3.381	3.376
8	3.140	3.131	3.123	3.115	3.108	3.102	3.095	3.090	3.084	3.079
9	2.926	2.917	2.908	2.900	2.893	2.886	2.880	2.874	2.869	2.864
10	2.764	2.754	2.745	2.737	2.730	2.723	2.716	2.710	2.705	2.700
11	2.636	2.626	2.617	2.609	2.601	2.594	2.588	2.582	2.576	2.570
12	2.533	2.523	2.514	2.505	2.498	2.491	2.484	2.478	2.472	2.466
13	2.448	2.438	2.429	2.420	2.412	2.405	2.398	2.392	2.386	2.380
14	2.377	2.367	2.357	2.349	2.341	2.333	2.326	2.320	2.314	2.308
15	2.316	2.306	2.297	2.288	2.280	2.272	2.265	2.259	2.253	2.247
16	2.264	2.254	2.244	2.235	2.227	2.220	2.212	2.206	2.200	2.194
17	2.219	2.208	2.199	2.190	2.181	2.174	2.167	2.160	2.154	2.148
18	2.179	2.168	2.159	2.150	2.141	2.134	2.126	2.119	2.113	2.107
19	2.144	2.133	2.123	2.114	2.106	2.098	2.090	2.084	2.077	2.071
20	2.112	2.102	2.092	2.082	2.074	2.066	2.059	2.052	2.045	2.039
21	2.084	2.073	2.063	2.054	2.045	2.037	2.030	2.023	2.016	2.010
22	2.059	2.048	2.038	2.028	2.020	2.012	2.004	1.997	1.990	1.984
23	2.036	2.025	2.014	2.005	1.996	1.988	1.981	1.973	1.967	1.961
24	2.015	2.003	1.993	1.984	1.975	1.967	1.959	1.952	1.945	1.939
25	1.995	1.984	1.974	1.964	1.955	1.947	1.939	1.932	1.926	1.919
26	1.978	1.966	1.956	1.946	1.938	1.929	1.921	1.914	1.907	1.901
27	1.961	1.950	1.940	1.930	1.921	1.913	1.905	1.898	1.891	1.884
28	1.946	1.935	1.924	1.915	1.906	1.897	1.889	1.882	1.875	1.869
29	1.932	1.921	1.910	1.901	1.891	1.883	1.875	1.868	1.861	1.854
30	1.919	1.908	1.897	1.887	1.878	1.870	1.862	1.854	1.847	1.841
40	1.826	1.814	1.803	1.793	1.783	1.775	1.766	1.759	1.751	1.744
50	1.771	1.759	1.748	1.737	1.727	1.718	1.710	1.702	1.694	1.687
60	1.735	1.722	1.711	1.700	1.690	1.681	1.672	1.664	1.656	1.649
70	1.709	1.696	1.685	1.674	1.664	1.654	1.646	1.637	1.629	1.622
80	1.689	1.677	1.665	1.654	1.644	1.634	1.626	1.617	1.609	1.602
90	1.675	1.662	1.650	1.639	1.629	1.619	1.610	1.601	1.593	1.586
100	1.663	1.650	1.638	1.627	1.616	1.607	1.598	1.589	1.581	1.573
150	1.627	1.614	1.602	1.590	1.580	1.570	1.560	1.552	1.543	1.535
200	1.609	1.596	1.583	1.572	1.561	1.551	1.542	1.533	1.524	1.516
400	1.582	1.569	1.556	1.545	1.534	1.523	1.514	1.505	1.496	1.488

QUANTILES D'ORDRE 0.95 DE LA LOI DE FISHER

Degrés de liberté du numérateur sur la première ligne  
 Degrés de liberté du dénominateur sur la colonne de gauche

	40	50	60	70	80	90	100	150	200	400
1	251.1	251.8	252.2	252.5	252.7	252.9	253.0	253.5	253.7	253.8
2	19.47	19.48	19.48	19.48	19.48	19.48	19.49	19.49	19.49	19.49
3	8.594	8.581	8.572	8.566	8.561	8.557	8.554	8.545	8.540	8.537
4	5.717	5.699	5.688	5.679	5.673	5.668	5.664	5.652	5.646	5.643
5	4.464	4.444	4.431	4.422	4.415	4.409	4.405	4.392	4.385	4.381
6	3.774	3.754	3.740	3.730	3.722	3.716	3.712	3.698	3.690	3.686
7	3.340	3.319	3.304	3.294	3.286	3.280	3.275	3.260	3.252	3.248
8	3.043	3.020	3.005	2.994	2.986	2.980	2.975	2.959	2.951	2.947
9	2.826	2.803	2.787	2.776	2.768	2.761	2.756	2.739	2.731	2.726
10	2.661	2.637	2.621	2.610	2.601	2.594	2.588	2.572	2.563	2.558
11	2.531	2.507	2.490	2.478	2.469	2.462	2.457	2.439	2.431	2.426
12	2.426	2.401	2.384	2.372	2.363	2.356	2.350	2.332	2.323	2.318
13	2.339	2.314	2.297	2.284	2.275	2.267	2.261	2.243	2.234	2.229
14	2.266	2.241	2.223	2.210	2.201	2.193	2.187	2.169	2.159	2.154
15	2.204	2.178	2.160	2.147	2.137	2.130	2.123	2.105	2.095	2.089
16	2.151	2.124	2.106	2.093	2.083	2.075	2.068	2.049	2.039	2.034
17	2.104	2.077	2.058	2.045	2.035	2.027	2.020	2.001	1.991	1.985
18	2.063	2.035	2.017	2.003	1.993	1.985	1.978	1.958	1.948	1.942
19	2.026	1.999	1.980	1.966	1.955	1.947	1.940	1.920	1.910	1.903
20	1.994	1.966	1.946	1.932	1.922	1.913	1.907	1.886	1.875	1.869
21	1.965	1.936	1.916	1.902	1.891	1.883	1.876	1.855	1.845	1.838
22	1.938	1.909	1.889	1.875	1.864	1.856	1.849	1.827	1.817	1.810
23	1.914	1.885	1.865	1.850	1.839	1.830	1.823	1.802	1.791	1.784
24	1.892	1.863	1.842	1.828	1.816	1.808	1.800	1.779	1.768	1.761
25	1.872	1.842	1.822	1.807	1.796	1.787	1.779	1.757	1.746	1.739
26	1.853	1.823	1.803	1.788	1.776	1.767	1.760	1.738	1.726	1.719
27	1.836	1.806	1.785	1.770	1.758	1.749	1.742	1.719	1.708	1.701
28	1.820	1.790	1.769	1.754	1.742	1.733	1.725	1.702	1.691	1.683
29	1.806	1.775	1.754	1.738	1.726	1.717	1.710	1.686	1.675	1.667
30	1.792	1.761	1.740	1.724	1.712	1.703	1.695	1.672	1.660	1.652
40	1.693	1.660	1.637	1.621	1.608	1.597	1.589	1.564	1.551	1.542
50	1.634	1.599	1.576	1.558	1.544	1.534	1.525	1.498	1.484	1.475
60	1.594	1.559	1.534	1.516	1.502	1.491	1.481	1.453	1.438	1.428
70	1.566	1.530	1.505	1.486	1.471	1.459	1.450	1.420	1.404	1.394
80	1.545	1.508	1.482	1.463	1.448	1.436	1.426	1.395	1.379	1.368
90	1.528	1.491	1.465	1.445	1.429	1.417	1.407	1.375	1.358	1.348
100	1.515	1.477	1.450	1.430	1.415	1.402	1.392	1.359	1.342	1.331
150	1.475	1.436	1.407	1.386	1.369	1.356	1.345	1.309	1.290	1.278
200	1.455	1.415	1.386	1.364	1.346	1.332	1.321	1.283	1.263	1.249
400	1.425	1.383	1.352	1.329	1.311	1.296	1.283	1.242	1.219	1.204