

Université MUSTAPHA Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى أسطمبولي

معسكر

Faculté des sciences et technologies

Département de Génie Mécanique

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau : LSTE

THESE de DOCTORAT de 3^{ème} cycle

Spécialité : Construction Mécanique

Option : Mécanique des matériaux et des Structures

Thème

Etude de la soudabilité des polymères par la technique de soudage par friction malaxage FSW

Couplage: procédé-propriété

Présentée par : Mr Hachellaf kaddour

Le : / /2019

Devant le jury :

Président	AID Abdelkrim	Professeur	Université de M. S. Mascara
Examineur	BOUCHAUICHA Benattou	Professeur	Université de Sidi Bel abbes
Examineur	BENHAMENA Ali	Professeur	Université de M. S. Mascara
Encadreur	MEDDAH Hadj Miloud	Professeur	Université de M. S. Mascara
Co-encadreur	Ouldchikh El-bahri	Professeur	Université de M. S. Mascara

« N'essayez pas de devenir un homme qui a du succès. Essayez de devenir un homme qui a de la valeur. »

ALBERT EINSTEIN.

Citation Célèbre

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui y ont collaboré, directement ou indirectement, lors des années de la préparation de cette thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du Jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens particulièrement à remercier mon directeur de thèse, prof Meddah H. Miloud et mon Co-encadreur prof Ould chikh EL B. pour les idées, les conseils, et les critiques.

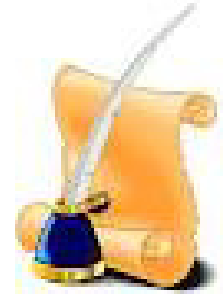
Je remercie également tous mes collègues techniciens du laboratoire de Génie mécanique pour ses aides, et mes collègues en enseignement qui m'ont offert une ambiance amicale, sympathique, dynamique et technique. Et tous les membres du laboratoires LSTE, et professeurs de l'institut de Génie mécanique leurs précieux conseils et leurs explications pédagogiques :

J'adresse un grand merci à mes parents et ma petite famille qui m'aiment et me supportent toujours. Leur soutien me donne une énergie des plus importantes pour avancer.

Enfin, je n'oublie pas ma toute famille qui a consenti des sacrifices importants qui ont permis la réalisation d'un travail passionnant mais chronophage.

Kaddour Hachellaf

Dédicace



*Je dédié le fruit de mes efforts à mes parents , a ma femme et mes enfants (Alaa et Adam)
pour leurs soutiens constants sur les plans morale , à mes frères , mes sœurs et mes chers
amis et tous mes camarades de l'université de mascara , sans oublié mes camarades de
laboratoire de génie mécanique et les camarades de doctorat mécanique.
Et à mes encadreurs et mes professeurs à l'université de mascara.*

Kaddour hachellaf.



Résumé

Le but de ce travail est de proposer un modèle d'outil qui pourrait être utilisé comme un outil prédictif pour obtenir une bonne soudure des polymères tel que le PEHD par l'utilisation de la technique de soudage par friction malaxage FSW ,un soudage linéaire bout à bout sur des plaques minces, Une série des essais expérimentaux concernant ce type de soudage (FSW) ont été réalisés avec différents type d'outils au fonction des paramètres optimaux de soudage tel que (vitesse d'avance, vitesse de rotation, la forme géométrique d'outil, etc.....), des résultats intéressants ont été établis pour évalués et mieux cerner l'influence paramétrique et qualification du domaine de soudabilité sur le PEHD.

Mots clés : FSW, Polymères, Loi de comportement, FEM, Couplage : procédé-propriété.

المخلص :

الهدف من عملنا هذا هو اقتراح نموذج أداة يمكن استخدامها كنموذج للحصول على لحام جيد للمواد للبولىميرات مثل HDPE من خلال استخدام تقنية اللحام بإحتكاك الاحتكاك FSW ، اللحام الخطي على لوحات رقيقة ، وقد أجريت سلسلة من الاختبارات التجريبية المتعلقة بهذا النوع من اللحام (FSW) مع أنواع مختلفة من الأدوات اعتمادا على معايير اللحام المثلى مثل (سرعة التقدم الاداة ، وسرعة الدوران ، شكل الهندسي للاداة ، الخ ...)، وقد تم إنشاء نتائج مثيرة و مهمة لتقييم وفهم أفضل تأثير الحدودي وتأهيل مجال قابلية اللحام على PE HD .

الكلمات المفتاحية : FSW ، البولىميرات ، القانون السلوك المواد ، FEM ، الاقران: الاسلوب -العملية .

Abstract :

The aim of our work is to propose a tool model that could be used as a predictive tool to obtain a good welding of polymers such as HDPE by the use of FSW friction stir welding technique, a linear welding end-to-end on thin flat, A series of experimental tests concerning this type of welding (FSW) have been carried out with different types of tools depending on the optimal welding parameters such as (speed of feed, speed of rotation, geometric tool shape, etc ...), interesting results have been established to evaluate and better understand the parametric influence and qualification of the weldable area on HDPE.

Key words: FSW, Polymers, Behaviour law, FEM, Coupling: process-property.

Sommaire

Résumé.....	I
Liste d'abréviations.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Introduction générale.....	V

Chapitre I Généralité sur les polymères

I.1.1 Introduction.....	4
I.1.2 Historique	4
I.1.3 Différentes classes de polymères.....	5
.1 Classification selon l'origine	5
.2 Classification selon l'architecture.....	5
.3 Classification selon le Comportement thermique et mécanique.....	6
.4 Classification selon la structure chimique.....	8
.5 Classification selon le comportement physique.....	9
.6 classification Selon leur domaine d'application.....	10
.7 selon Le point de vue thermique.....	10
I.1.4 Synthèse des polymères.....	11
I.1.4.1 Elaboration des polymères.....	12
I.1.5 Domaine d'utilisation.....	12
I.1.6 rupture et déformation des polymères.....	14
I.1.7 Propriétés des polymères.....	15
I.1.8 Polymère solide amorphe et semi cristallin.....	17
I.2 Le polyéthylène à haute densité (PEHD).....	19
I.2.1 Introduction.....	20

I.2.2 Histoire de PEHD.....	20
I.2.3 Propriétés des polyéthylènes hautes densité.....	21
I.2.4 Domaines d'application du PEHD.....	23
I.2.6 Vieillissement des polymères.....	24
I.2.7 Micro mécanismes d'endommagement de déformation et des polymères semi-cristallins.....	26
I.2.8 D'autres Comportements	28
I.2.9 paramètres influençant sur la déformation du PEHD.....	29
I.2.10 Conditions d'usinage du PEHD.....	32
I.2.11 Mise en œuvre du PE	33
Conclusion.....	34

Chapitre II Les Assemblages Permanents

II.1.1 Introduction.....	42
II.1.2 Définition	42
II.1.2 Les assemblages Permanents Mécaniques.....	43
a) Rivetage	44
b) Frettage.....	44
c) Clinchage.....	45
d) Sertissage.....	45
e) Collage.....	46
1- principaux adhésifs utilisés dans l'industrie.....	46
- Adhésifs anaérobies.....	47
- Cyanoacrylates.....	47
- Résines acryliques à haute ténacité.....	47
- Résines époxydes.....	47
- Polyuréthanes.....	47
- Résines phénoliques.....	47
1- principaux adhésifs utilisés dans l'industri.....	47

-Adhésifs anaérobies.....	47
- Cyanoacrylates.....	47
- Résines acryliques à haute ténacité.....	47
- Résines époxydes.....	47
- Polyuréthanes.....	47
- Résines phénoliques.....	47
II.1.2.2 Les Assemblages Permanents Thermiques.....	48
Le soudage autogène.....	48
1.2. Le soudage hétérogène.....	48
II.1.2.3 Classification des procédés de soudage	48
1) Le soudage par fusion.....	49
a) Soudage au gaz oxyacétylénique (soudage par chalumeau).....	49
b) Soudage à l'arc électrique.....	50
c) Soudage par faisceaux à haute densité d'énergie.....	54
2) Le soudage par pression.....	56
a) Le soudage par points.....	56
b) Le soudage par bossage.....	56
c) Le soudage à la molette.....	57
d) Le soudage en bout par étincelage.....	57
3) Le soudage par friction.....	58
II. 1.2.4 Les avantages et inconvénients des procédés d'assemblages pour l'Assemblages permanent.....	59
2. pour l'Assemblages permanents thermiques.....	59
II.1.2.5 Conclusion	60
II. 2 Soudage par friction-malaxage.....	60
II.2.1 Introduction.....	60
II.2.2 Le Procédé de soudage par friction malaxage.....	60
II.2.3 Description du procédé.....	61
II.2.5 Les Avantages et les inconvénients du procédé FSW.....	63
II.2.5.a Les avantages	63

Avantages métallurgiques.....	63
Avantages environnementaux.....	63
Avantages énergétiques.....	63
II.2.5.b Les inconvénients	64
II.2.6 Configuration des joints soudés par FSW.....	64
II.2.7 Machines dédiées au FSW.....	65
II.2.8 Les outils de soudage FSW.....	66
II.2.8.1 Le soudage des matériaux par FSW.....	69
II.2.8.2 Matériaux des outils de FSW.....	72
II.2.8.3 Propriétés métallurgiques des soudures obtenues.....	74
II.2.9 Phénomènes physiques observés dans le procédé de soudage.....	75
II.2.9.1 La formation du cordon de soudure.....	75
a-Etat de surface des joints soudés.....	78
b-Bavures.....	79
c-Rugosité.....	79
II.2.9.2 Distribution des températures.....	80
II.2.9.3 Contraintes Résiduelles.....	80
II.2.9.4 Flux de chaleur.....	82
II.2.9.5 Interaction outil-pièce.....	82
II.2.9.6 Déformation plastique du matériau.....	82
II.2.9.7 Les défauts de vide du soudage.....	84
II.2.9.8 Prédiction des défauts de soudure.....	85
II.2.9.9 Principaux domaines d'application.....	86
.1 Dans le domaine spatial.....	87
.2 Dans le domaine automobile.....	86
.3 Dans l'industrie aéronautique.....	86
.4 Dans le domaine du nucléaire.....	87
.5 Dans le domaine ferroviaire.....	87
.6 Dans le domaine naval.....	88

Conclusion.....88

Chapitre III Etude Expérimentale

III.1 introduction90

III.2. Equipements et matériaux90

III.2.1 Préparation des éprouvettes.....90

III.2.2 Opération du Soudage par FSW93

 Outils utilisés en soudage FSW93

 Paramètres de coupes93

Principe de soudage FSW94

III.1.3. Démarche expérimental96

III.3 L'essai de Traction.....99

III.4 Essai de micro-dureté.....100

Conclusions Générale et Perspectives.....111

Liste des abréviations

ASTM : American Society for Testing and Materials
PTFE : Polytétra-fluoro-éthylène
PVC : Polychlorure de vinyle
PEBD : Polyéthylène basse densité
PEBDL : : polyéthylène basse densité linéaire
PEMD : Polyéthylène Moyenne densité
POM : polyoxyméthylène
PEHD: Polyéthylène haute densité
PP : Polypropylène
PS : Le polystyrène
POE : poly-oxyde d'éthylène
PMMA: poly méthacrylate de méthyle
PVB : Polybutyral de vinyle
PEEK : Polyétheréthercétone
PA6 : polyamide
PC : polycarbonate
PU : Polyuréthane
PETP : Polytéraphthalate d'éthylène
PF : Phénol- formaldéhyde
FSW : friction stir welding (soudage par friction malaxage)
FSSW : friction stir spot welding (soudage parpoint par friction malaxage)
Mn : Masse molaire
Tg : Température de transition vitreuse
Tf : Température de fusion
ISO : International Standards Organisation
ZAT : zone affectées thermiquement (HAZ)
BM : métal de base
ZAT: zone affectée thermiquement
ZATM: zone affectée thermo mécaniquement (TMAZ)
NZ :zone noyau(zone centrale)
MRS : contrainte minimale requise[MPa]
3D : Trois dimensions
FEM : Méthode des éléments finis
CAE : Complete Abaqus Environment
ALE : Maillage adaptatif Arbitrairement Lagrangienn-Eulerien
DRX : Diffraction des rayons X

Notations et Unités

G_{Ic}: taux restitution d'énergie critique en mode I ([kJ/m²]).

K_{Ic}: ténacité du matériau([MPam]^{0.5})

µm : Micron mètre

R_m : Résistance à la traction[MPa]

E : Module d'Young [MPa]

ε : déformation

ν: coefficient de Poisson

N : fréquence de rotation (tour/min)

V_a : vitesse d'avance de l'outil (mm/min)

HV : micro dureté Vickers

R_m : Résistance à la traction [MPa]

A % Allongement à la rupture.

Re 0.2 : Limite d'élasticité conventionnelle correspondant à une déformation de 0,2%

Re: contrainte à la limite élastique [MPa]

Liste des figures

Figure N°	Page
Chapitre I	
Figure I.1 Schématisation d'une organisation macromoléculaire cristalline (à gauche) et amorphe (à droite).....	5
Figure. I.2 : Classification des architectures macromoléculaires.....	6
Figure I.3 : Classification des polymères selon le comportement mécanique.....	7
Figure. I.4: Etat semi-cristallin d'un polymère.....	9
Figure. I.5: Formation d'un polymère.....	10
Figure I.6: Courbes contrainte vraie – déformation vraie de divers polymères Obtenues à 25°C.....	15
Figure I.7 : Comparaison de différents types des polymères au fonction de contrainte – déformation.....	14
Figure I.8 : Courbes contrainte-déformation du PMMA A différentes températures.....	15
Figure I.9 : Déférentes sollicitations mécanique d'un polymères	15
Figure I.10 : Structure d'un polymère semi-cristallin.....	18
Figure I.11: Représentation multi échelle de la morphologie microstructurale des polymères semi cristallins.....	18
Figure I.12 : Différentes échelles d'organisation d'un polymère semi-cristallin :	
(a) conformation de chaîne, (b) lamelles cristallines, (c) sphérolite.....	19
Figure I.13: Présentation d'un sphérolite de polyéthylène.....	21
Figure I.14 : Représentation multi-échelle de la structure du PEHD semi-cristallin : passage de la structure cristalline (maille orthorombique) à l'agrégat sphérolitique et échelles correspondantes.....	23
Figure I.15: Partitions des thermoplastiques dans le monde.....	24
Figure. I.16: Schématisation de la pénétration d'un solvant dans un polymère.....	25
Figure. I.17. Micromécanismes de déformation de la phase amorphe dans un polymère semi-cristallin.....	27
Figure I.18: Régions d'arrangement des lamelles cristallines dans les sphérolites.....	28
Figure I.19: Rupture de tubes de PE sous pression hydrostatique ductile (b) fragile.....	28

Figure I.20 : Courbes contrainte-déformation vraies d'un (PEHD):.....	30
Figure I.21: Variation de la contrainte à la limite élastique (Re).....	30
En fonction de la température T	
Figure I.22: représente molécule polyéthylène	32
Figure I.23: matière première de production de polyéthylène.....	33
Figure I.24: Représentation d'une machine d'extrusion des tubes.....	34

Chapitre II

Figure II.1 : type d'assemblage des pièces.....	42
Figure II.2 : types d'assemblage.....	43
Figure II.3 : principe de fixation d'un rivet.....	44
Figure II.4 : processus de frettage.....	44
Figure II.5 : principe de Clinchage	45
Figure II.6 : Exemples d'ouvrants sur un véhicule Assemblés par sertissage.....	45
Figure II.7: tension d'une goutte de colle.....	46
Figure II.8 : Organigramme des procédés de soudage.....	49
Figure II.9 : Organigramme des procédés de soudage par fusion.....	50
Figure II.10 : Principes de soudage par chalumeau.....	51
Figure II.11: le soudage a arc avec électrode enrobée.....	51
Figure II.12 : Schéma de la torche à plasma MIG/MAG.....	52
Figure II.13 : Schéma d'une Opération de soudage MIG/MAG.....	53
Figure II.14 : Principe du soudage plasma.....	54
Figure II.15 : Principe du soudage laser	55
Figure II.16: principe de soudage par faisceau d'électrons.....	55
Figure II.17: principe de soudage Ultrasons.....	56
Figure II.18 : soudage par point.....	56
Figure II.19: soudage Par bossage.....	57
Figure II.20: principe de soudage par molette.....	57
Figure II.21 : principe de soudage en bout.....	58

Figure II.22 principe de soudage par friction orbital.....	58
Figure II.23 : principe de soudage par friction linéaire	59
Figure II. 24: Schéma du procédé de soudage par friction-Malaxage.....	61
Figure II. 25 Exemple d'un Outil de soudage FSW.....	61
Figure II. 26: Schématisation des efforts et du couple générés lors du FSW.....	62
Figure II. 27: Schéma de différentes configurations possibles en FSW.....	64
Figure II. 28: Schéma des machines-outils pour le FSW.....	65
Figure II. 29 Forme d'outil pour le soudage FSW	66
Figure II. 30 : Exemple de géométrie d'épaulement	66
Figure II. 31 : Angle d'inclinaison de l'outil	68
Figure II. 32 : Différentes géométries du pion [31].....	68
Figure II.33: Différent forme des pions d'un outil FSW.....	69
Figure II.34 : Mesure de la force F et du couple C lors d'un soudage par FSW.....	72
Figure II.35 : Schéma d'un système de refroidissement d'outil Megastir.....	73
Figure II.36 : Transferts thermiques induits par le procédé FSW.....	76
Figure II.37 : Schéma d'évolution de la température aux cours des différentes étapes	77
Figure II.38 : Schéma d'une coupe transverse de soudure FSW.....	78
Figure II.39 : Macro graphie d'une soudure FSW d'un alliage d'aluminium.....	78
Figure II.40 : Système de bridage en soudage FSW.....	79
Figure II.41: Surface d'un cordon de soudure FSW	80
Figure II. 42: Distribution des contraintes résiduelles après soudage.....	81
Par FSW de l'alliage 6013-T4.....	
Figure II. 43 : Les éléments de la microstructure observés dans la coupe transversale.....	83
Figure II. 44: Observation de Défaut de vide sur le cordon de soudage	84
Figure II. 45: Trou tunnel en arrière de pion simulé numériquement.....	85
Figure II. 46 :Formation d'un trou à l'arrière du pion.....	85
Figure II.47 : Application du FSW sur le Mazda Rx-8.....	86
Figure II.48 : Assemblage de l'avion Eclipse 500 avec le procédé de soudage FSW.....	87

Figure II. 49: Soudage de profilé du train Hitachi.....	87
Figure II. 50 : Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destiné au pont du bateau de croisière "The World".....	88

Chapitre III

Figure III.1 la Géométrie des plaques préparées.....	91
Figure III.2: Tube en PEHD.....	91
Figure III.3 : Fraiseuse VHF-2	92
Figure III.4 : Scie circulaire d'atelier.....	92
Figure III .5 : présentation des outils utilisés T7 et T9 [3].....	93
Figure III.6 : l'opération de soudage FSW.....	94
Figure III.7 : cinématique de l'outil FSW dans différentes phase de soudage.....	94
Figure III.8 : cordon de soudage FSW.....	96
Figure III.9 : Géométries de l'éprouvette de traction non soudée.....	99
Figure III.10 : Géométries des éprouvettes de traction après Soudage FSW.....	99
Figure III.11 : Schéma du principe de fonctionnement du système « vidéo-traction.....	100
Figure III. 12: Schéma du principe du système « vidéo traction ».....	100
Figure III. 13: Courbes contrainte-déformation d'éprouvette Non soudée (Éprouvette témoin).....	101
Figure III. 14: résultats de traction des éprouvettes soudées.....	102
Figure III.15 : Principe de la dureté Vickers.....	104
Figure III.16: Testeur de micro-dureté type FV-ARS 9000.....	105
Figure III.17: Vue microscopique Sous Caméra testeur.....	105
Figure III.18 : profil du joint soudé.....	106
Figure III.19: empreinte pyramide Vickers	106
Figure.III.20: Variation de micro-dureté Vickers HV.....	107

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau N°	page
Tableau I.1 : Différents types d'homopolymères	8
Tableau I.2 : Différents modes de copolymères	8
Tableau I.3 : Quelques polymères usuels.....	13
Tableau I.4 : Caractéristiques des polymères courants.....	16
Tableau I.5 : Les valeurs la Résilience et ténacité des polymères.....	17
Tableau I.6 : Propriétés mécaniques et thermiques de polyéthylène	22
Tableau I.7 : Caractéristiques majeurs des différentes familles des polyéthylènes	22
Tableau I.8 : Valeurs de la contrainte à la limite élastique (Re) en fonction de la température T.....	30
Tableau I.9 : Principaux types d'additifs utilisé les matériaux plastiques.....	31

Chapitre III

Tableau III.1 : propriétés mécanique de la résine utilisée pour PEHD.....	90
Tableau III.2 : caractéristiques mécaniques et physiques du polyéthylène.....	91
Tableau III.3 : Les Résines utilisées pour les tubes PEHD.....	92
Tableau III.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques du PEHD.....	92
Tableau III.5 : paramètres de soudage FSW.....	93
Tableau III.6 : Paramètres et vues des plaques soudées.....	96
Tableau III.7 : présente les paramètres de processus de soudage pour outil T7 et T9.....	98
Tableau III.8 : représente les valeurs de résistance à la traction et leur efficacité sur le cordon soudé.....	103

Introduction générale

La technologie d'assemblage est une technique importante et notamment le soudage des métaux, ce dernier est un assemblage permanent et très important considéré comme une technologie principale en toute l'industrie surtout en montage et production industrielle au niveau mondiale, parmi tous les soudages connus à travers le temps et le système de l'industrialisation on a la technique de soudage par friction malaxage (FSW), ce type de procédé de soudage est le plus récent il a été inventé et breveté en 1991 par le TWI (The Welding Institute) à Grande Bretagne. Comme la soudure est réalisée à l'état solide du matériau à assembler, des forces importantes sont générées sur l'outil. Cela nécessite l'utilisation de machines spécifiques de type portique. Pour baisser le coût d'investissement, des robots industriels peuvent être mis en œuvre pour des épaisseurs à souder, Pour de plus fines épaisseurs, des essais sont réalisés sur des commandes numériques de type fraiseuse. On trouve ses applications dans le domaine de l'industrie par exemple le soudage des structures des bateaux, train à grande vitesse TGV, carrosserie d'automobiles ext....

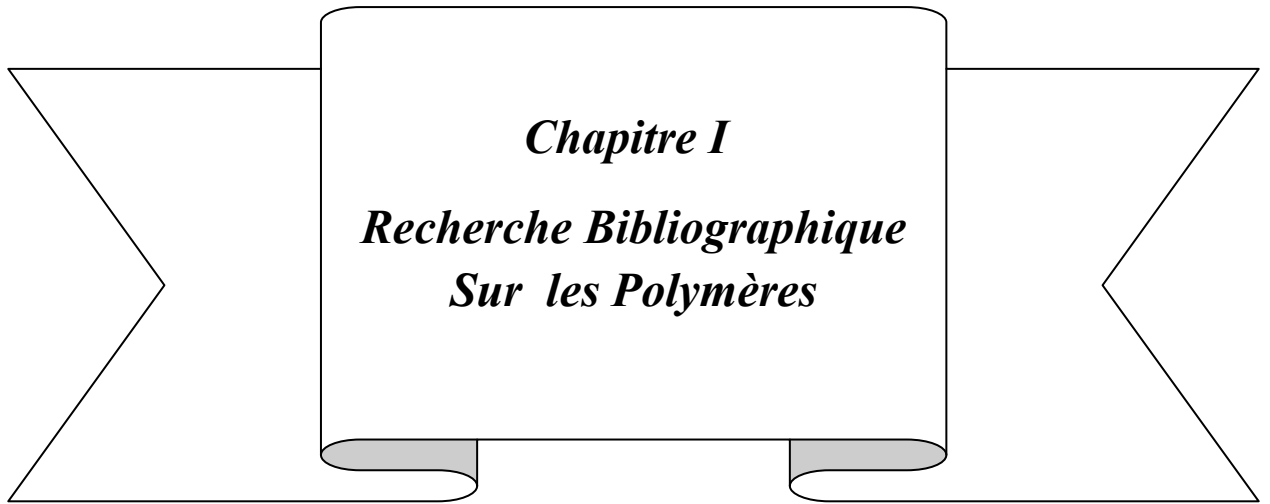
Les études sont en cours sur ce procédé pour améliorer son outil spécifique et son cordon de soudure et les propriétés mécaniques attendaient sur plusieurs matériaux comme les métaux non ferreux et les thermoplastiques.

Dans ce mémoire, nous avons organisé le travail comme suivant :

Le chapitre I une étude bibliographique concernant les polymères et particulièrement le polyéthylène à haute densité (PEHD) et leurs propriétés, structure, mise en œuvre et domaine d'application..ext

Dans le chapitre 2, nous présentons une étude bibliographique sur les assemblages permanent puits le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) méthode et procédé on basant sur la géométrie de l'outil et leur caractéristique et les paramètres qui influant sur la qualité du cordon de soudure.

Le chapitre 3 est consacré à une étude expérimentale où on donne les résultats pratiques et discussion, tout ce travail expérimental début par la préparation des éprouvettes a partir du tube de PEHD pour faire les opérations de soudage FSW sur la machine fraiseuse, puis faire des essais de traction et finalement voir les résultats et commentaires et discussions profondes et conclusion générale.



Chapitre I

***Recherche Bibliographique
Sur les Polymères***

I.1 Généralité sur les polymères

I.1.1 Introduction

Ce premier chapitre propose une recherche bibliographique sur les polymères, leurs caractéristiques et ainsi leurs méthodes de synthèse y seront présentées d'une manière générale. Puis dans la deuxième partie on basant sur le PEHD et leur synthèse, domaine d'application. Les polymères sont des substances constituées de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou de plusieurs unités de base [1].

I.1.2 Historique

Les polymères, ces dernières années, ont trouvé une utilisation dans une variété d'application. Certains sont utilisés dans des applications dentaires et médicales. Leur excellente isolation les rend bien adaptés aux applications électriques. En outre, ils ont un usage intensif comme matériaux d'emballage. En termes d'application mécanique, dans certains systèmes, les roulements, les pignons, les joints sont faits de plastique. En remplacement des métaux, ils sont maintenant largement utilisés pour la fabrication des tubes pour le transport des fluides [2].

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs, et « meros » partie [3]. Les polymères sont des matériaux composés de très longues chaînes (macromolécules), elles-mêmes formées de molécules élémentaires (monomères) assemblées entre elles. Ces chaînes sont principalement constituées d'atomes de carbone sur lesquels sont fixés des éléments comme l'hydrogène ou l'oxygène. D'autres éléments, notamment le chlore, l'azote ou le fluor, peuvent encore intervenir dans la composition de la chaîne [4].

Le polymère est dit amorphe si le désordre moléculaire est complet. Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation de celles-ci dans des zones submicroniques. Les chaînes sont enchevêtrées sous forme de pelotes statistiques (figure I.1). Les segments de chaînes sont capables de créer une certaine mobilité moléculaire si des espaces libres sont régulièrement distribués dans tout le volume du matériau. Ces espaces constituent le volume libre du matériau qui détermine la mobilité des macromolécules et l'aptitude du polymère à changer de conformation. [4].

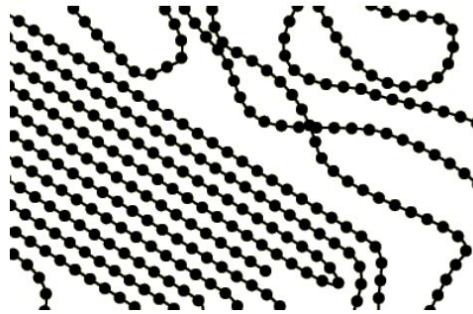


Figure I.1 Schématisation d'une organisation macromoléculaire cristalline (à gauche) et amorphe (à droite). [5]

I.1.3 Différentes classes de polymères

J. C. Richer [6], Groupe IUPAC [7] et d'autres chercheurs étudient la classification des polymères, peuvent être classés selon leur origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le types de polymérisation, comme base de la classification.

1. Classification selon l'origine : On peut les classer en trois catégories [6,7].

- ✓ *les polymères naturels* : sont issus des règnes végétal ou animal. Leur importance est considérable. On peut cependant mentionner, dans cette catégorie, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...), celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel, etc.....
- ✓ *les polymères artificiels* : sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certains de leurs propriétés ; les esters cellulosiques ont toujours connu une certaine importance économique.
- ✓ *les polymères synthétiques* : totalement issus du génie de l'homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères [1].

2. Classification selon l'architecture

Selon Tomalia [8], Moingeon [9] et Wiess [10] les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles : les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques.

✓ *Les polymères linéaires (ou monodimensionnels) :*

les chaînes de monomères sont aussi reliées entre eux par des ponts hydrogènes ou des liaisons de Van der Waals [11]. Ces liaisons secondaires assurent la stabilité du

polymère et lui confèrent une certaine rigidité. Sous l'effet d'une température élevée le polymère acquiert le comportement d'un liquide visqueux, en parle alors d'une température de transition vitreuse, qui marque le passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique[10].

✓ **Les polymères ramifiés (ou bidimensionnels)**

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation (figure I.2). Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires [10].

✓ **Les polymères réticulés (ou tridimensionnels)**

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace, au cours d'une polymérisation de polymères linéaires, qui conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel, (figure I.2) [10].

Les polymères dendritiques (hyperbranches) : selon Paul Flory [12] est constituée la quatrième famille d'architecture macromoléculaire, qui a le premier évoqué la possibilité de synthétiser des dendrimères à partir de monomères multifonctionnels [13], mais ce n'est qu'à la fin des années 1970 que Huisler et les autres [14] ont décrit la première synthèse de dendrimères (qu'il a appelé « arborols »), suivi par Tomalia [8] et Newkome [15].

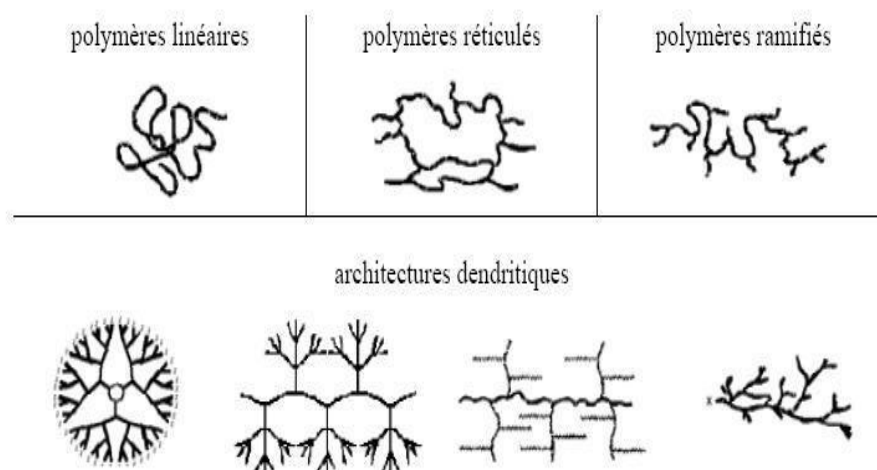


Figure. I.2 : Classification des architectures macromoléculaires [2,8].

3. Classification selon le Comportement thermique et mécanique

Plusieurs chercheurs conviennent que les polymères sont divisés en quatre grandes familles

son note :

✓ **Polymères thermoplastiques**

Ce sont des polymères linéaires, fusibles et soluble dans les solvants organiques et ils sont en générale recyclable, c'est-à-dire, ils permettent le chauffage et le refroidissement plusieurs fois lors du moulage des pièces [16, 17].

✓ **Les polymères thermodurcissables**

Ils durcissent au cours de la polymérisation lors de la montée en température en formant un réseau tridimensionnel de monomères liés par liaisons covalentes. La transformation est unique et donne lieu à une pièce définitive. Donc, il n'existe pour eux ni solvant, ni phase fondue. Les thermodurcissables ne sont pas recyclables et leur mise en forme est plus complexe [17, 18].

✓ **Les élastomères**

Ce sont des polymères qui peuvent être étirés à au moins deux fois leur longueur d'origine et qui se rétractent à leur dimension initiale dès que cesse la force d'étirement et ce sans vulcanisation. Parmi les avantages des élastomères, il faut citer une excellente mise en œuvre, de bonnes propriétés mécaniques, un très faible échauffement interne et une très bonne tenue au froid [18, 19].

✓ **Les polymères thermostables**

Ce sont des polymères qui conservent leurs propriétés quelques minutes à 600°C, quelques heures à 400°C, plus de 100 heures à 300°C et plus de 30000 heures à 220°C. [11, 18].

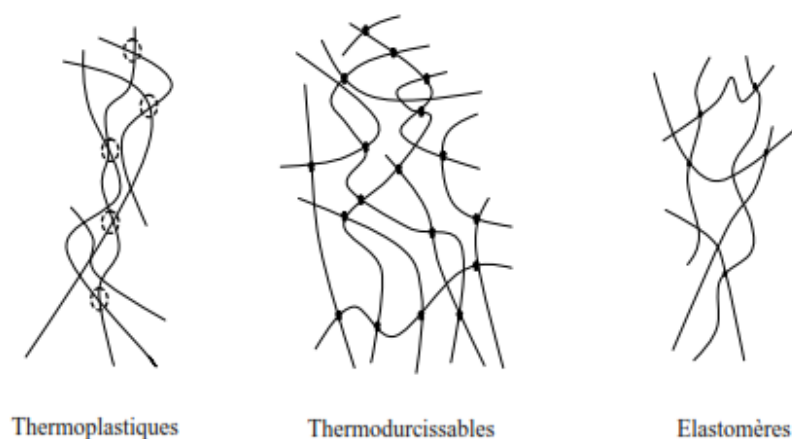



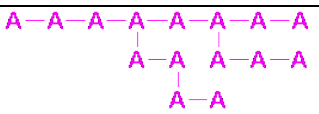
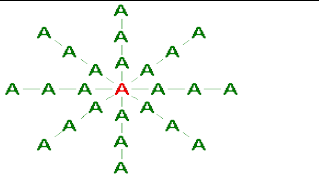
Figure I.3 : Classification des polymères selon le comportement mécanique [21].

4. Classification selon la structure chimique [2,20]

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

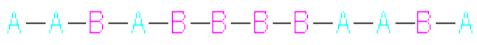
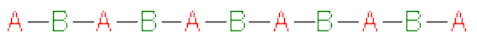
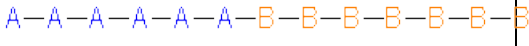
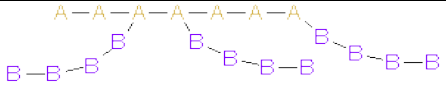
□ **Les homopolymères:** sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes. Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve: les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

Tableau I.1 Différents types d'homopolymères [22] :

Type d'homopolymère	En chaîonnement d'unité
a) homo-polymers linéaires	
b) Les homo-polymères branchés.	
c) Les homo-polymères étoilés.	

□ **Les copolymères:** sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons: le mode statistique, alterné, séquencé et greffé.

Tableau I.2 Différents modes de copolymères [22].

Type de copolymère	enchaînement d'unité
1) le mode statistique	
2) le mode alterné	
3) le mode séquencé	
4) le mode greffé	

5. Classification selon le comportement physique

Dans sa thèse, Seyni [21] a étudié la classification de structure physique des polymères où il a montré quatre types d'état :

□ **L'état amorphe** : dans lequel les arrangements moléculaires n'ont pas d'ordre prédéfini.

Les macromolécules sont enchevêtrées en pelotes. Cette absence d'ordre engendre une absence de point de fusion, l'existence d'une température de transition vitreuse qui marque le passage d'un état vitreux (où le matériau se comporte comme un verre, c'est-à-dire dur et cassant) à un état caoutchoutique (où les chaînes peuvent glisser plus facilement), ainsi qu'une transparence dans le visible comme cela est le cas du polystyrène « cristal » ou du poly (chlorure de vinyle) « cristal » qui sont tous deux amorphes.

□ **L'état amorphe orienté** : où les arrangements moléculaires sont tous orientés dans la même direction.

□ **L'état cristallin**, caractérisé par un arrangement organisé des molécules. Les chaînes s'organisent de façon ordonnée et compacte. Le cristal polymère est décrit par son réseau et son motif. Le réseau caractérise la périodicité dans les trois directions de l'espace. Les principales caractéristiques de l'état cristallin sont une compacité supérieure à celle de la phase amorphe, l'existence d'un point de fusion et l'absence de transition vitreuse, une rigidité supérieure à celle de la phase amorphe.

□ **L'état semi cristallin**, qui associe à la fois un arrangement organisé et des zones amorphes [21].

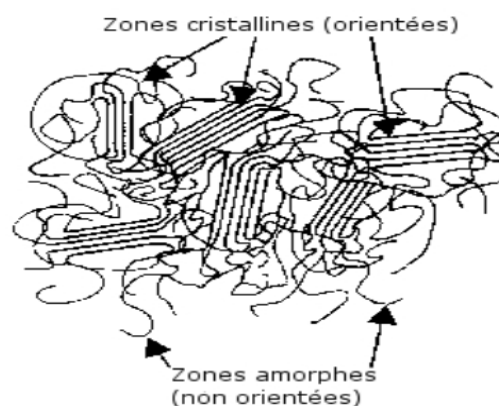


Figure. I.4: Etat semi-cristallin d'un polymère [23].

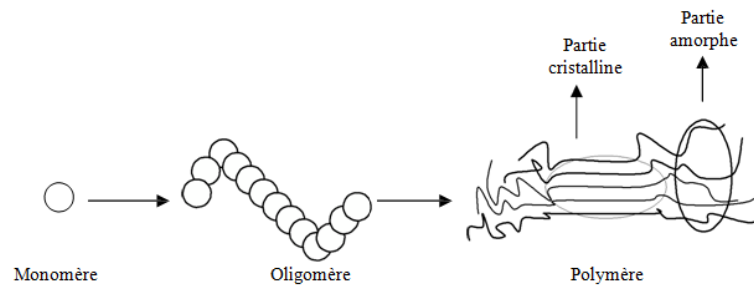


Figure. I.5: Formation d'un polymère [2,21].

6. classification Selon leur domaine d'application [24]

D'après Fontanille et Gnanou [24], Il est difficile de proposer une classification exhaustive tant la variété des propriétés a multiplié les applications des polymères, comme matériaux en particulier. Il est cependant possible de regrouper les polymères en trois grandes catégories :

- **les polymères de grande diffusion** (encore appelés polymères de commodité), dont la production annuelle s'évalue en millions de tonnes, sont devenus d'un emploi quotidien. Le polyéthylène, le polystyrène, le poly (chlorure de vinyle) et quelques autres sont à classer dans cette catégorie ; ils présentent une importance économique considérable ;
- **les polymères techniques** ont des caractéristiques mécaniques qui leur permettent de se substituer, de plus en plus, aux matériaux traditionnels (métaux, céramiques...) dans de nombreuses applications ; les polyamides, les polyacétals... font partie de cette famille ;
- **les polymères spéciaux** (ou **polymères de fonction**) présentent généralement une propriété spécifique qui induit leur utilisation pour une application particulière. C'est dans cette catégorie que se trouvent les polymères conducteurs, photoactifs, thermostables, adhésifs, etc. Tous les spécialistes ne donnent pas la même définition à chacune de ces catégories même s'ils s'accordent sur les termes ; un choix a été fait dans le cadre de cet ouvrage, qui veut être une proposition.

7. selon Le point de vue thermique

On sépare les matériaux organiques polymères en deux catégories : les thermoplastiques et les thermodurcissables [1,25,26].

a. Thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des matériaux qui se ramollissent par élévation de leur température ; leur module d'élasticité diminue ; ils se déforment et présentent des viscosités

décroissantes. Si la méthode expérimentale implique une déformation croissante, comme c'est le cas des essais d'étirement ou de compression, la déformation connaît sa limite à la rupture. Cette limite est repoussée plus loin par l'élévation de la température de l'essai, jusqu'à ce que le matériau se comporte comme un liquide visqueux. Cette viscosité diminue encore jusqu'à une température qui n'est plus supportable sans dégradation chimique de la matière.

b. Thermodurcissables

Les thermodurcissables, au contraire, ne peuvent jamais revenir à l'état initial quand leur température a été augmentée : ils sont transformés irréversiblement. En effet la nature chimique du produit initial fait qu'à température constante, et surtout au-dessus de sa température de transition vitreuse, une transformation chimique se produit qui élève de façon irréversible cette transition vitreuse. Comme pour les thermoplastiques, une élévation instantanée de la température diminue le module d'élasticité et la viscosité en écoulement ; mais, au cours du temps, les valeurs observées de ces paramètres à cette température changent et évoluent vers une augmentation [1,25,26].

I.1.4 Synthèse des polymères

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement cristallisés [10], au sens large, le terme polymérisation désigne l'ensemble des procédés de formation de chaînes à partir de molécules plus petites (monomères). Il existe deux types de polymérisation [1,12] : une est la polycondensation et est l'autre est polymérisation en chaîne, couramment appelée polymérisation, ces polymères obtenus sont respectivement dénommés polymérisats et polycondensats.

a. Polycondensation

Au cours de polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes. Les polyamides, les polyesters et certains polyuréthanes sont des exemples typiques de polymères obtenus par polycondensation. Dans ce cas, les réactions qui démarrent la polymérisation appelées réactions d'initiation, sont ioniques. Par choix judicieux du groupement ionique initiateur, on peut dans certains cas obtenir une réaction stéréospécifique, c'est-à-dire que la disposition des monomères dans le polymère n'est pas aléatoire, mais au contraire orientée. C'est la seule façon d'obtenir des polymères

semi-cristallins aux propriétés mécaniques particulières, et qui ont par exemple, donné lieu à des applications dans le domaine des élastomères de synthèse [1,12].

b. Polymérisation en chaîne

Dans la polymérisation en chaîne, les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée. C'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie : le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène,... sont des exemples de polymères obtenus par polymérisation en chaîne. Comme toute réaction en chaîne, cette polymérisation comporte les étapes suivantes première est l'amorçage est formation des centres à partir du monomère la deuxième est la propagation c'est une croissance des chaînes de polymère par addition successives et la troisième est la terminaison c'est la destruction [1,12].

I.1.4.1 Elaboration des polymères

Les polymères sont synthétisés en reliant entre elles par des liaisons covalentes des petites molécules, appelées molécules de monomère, molécules monomères ou plus simplement monomères, après leur synthèse, utilisés tels quels. On leur ajoute diverses substances les polymères ne sont jamais qui modifient leur comportement, en remplissant différentes fonctions

- stabilisants : le polymère « pur » est fragile. Il peut subir sous l'action de divers agents (chaleur, lumière, eau, radiations ionisantes, actions mécaniques lors de la transformation, etc.) des réactions de dégradation, qui se traduisent par une modification de la structure chimique (oxydation) et/ou une diminution de la masse molaire, et entraînent une altération des propriétés physiques. L'emploi de stabilisants permet de limiter ces phénomènes ;

- additifs pour faciliter la transformation : lubrifiants, agents de démoulage, etc...[10].

- colorants : pigments minéraux (dioxyde de titane) ou organiques (noir de carbone) ;

- plastifiants : pour rendre le matériau plus souple ;

- charges (carbonate de calcium, mica, talc) et renforts (fibres de verre) : l'objectif peut être une réduction du coût, mais on cherche en général une amélioration des propriétés mécaniques (augmentation du module d'élasticité) ;

- renforcement au choc : nodules de caoutchouc ;

- additifs anti-combustion, etc.....[10].

I.1.5 Domaine d'utilisation

Les polymères ont envahi tous les domaines de notre vie quotidienne. C'est pourquoi les exemples ci-dessous n'offrent qu'une vue très partielle de la réalité comme le domaine des

vêtements et textiles : fibres textiles naturelles et synthétiques, non tissés, skaï, simili cuir ; en maroquinerie et des chaussures dans le domaine d'ameublement : skaï, simili cuir, colles, vernis, mousses ; articles ménagers comme tupper-ware, poubelles, seaux, vaisselle ;

Tableau I.3 : quelques polymères usuels [22].

Appellation courante et Abréviation Normalisée	motif monomère et formule développée	Domaine d'application
Polyéthylène (PE)	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2 \quad *-\left(\begin{array}{c} \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{H}_2 \end{array}\right)_n*$	C'est le matériau d'emballage par excellence.
Polypropylène (PP).	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH} \begin{array}{c} \\ \text{CH}_3 \end{array} \quad *-\left(\begin{array}{c} \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \quad \quad \text{CH}_3 \end{array}\right)_n*$	C'est un plastique dur, On le retrouve dans tous les matériaux de plomberie
polychlorure de vinyle (PVC).	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH} \begin{array}{c} \\ \text{Cl} \end{array} \quad *-\left(\begin{array}{c} \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \quad \quad \text{Cl} \end{array}\right)_n*$	On l'utilise pour la fabrication des chaussures synthétiques et des disques
Polytétra-fluoroéthylène (PTFE)	$\text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2 \quad *-\left(\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ \text{C} \quad \text{C} \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}\right)_n*$	Ce polymère est plus connu sous le nom de Téflon (antiadhésif).
Le polystyrène (PS)	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH} \begin{array}{c} \\ \text{Ph} \end{array} \quad *-\left(\begin{array}{c} \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \quad \quad \text{Ph} \end{array}\right)_n*$	On s'en sert pour les emballages.
poly-oxyde d'éthylène (POE)	$\text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2 \begin{array}{c} \diagup \quad \diagdown \\ \quad \quad \text{O} \end{array} \quad *-\left(\begin{array}{c} \text{C}-\text{C}-\text{O} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{H}_2 \end{array}\right)_n*$	On l'utilise en cosmétique.
poly méthacrylate de méthyle (PMMA)	$\text{H}_2\text{C}=\text{C} \begin{array}{c} \\ \text{CH}_3 \\ \\ \text{O}=\text{C}-\text{OCH}_3 \end{array} \quad *-\left(\begin{array}{c} \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{CH}_3 \\ \quad \quad \\ \quad \quad \text{COOCH}_3 \end{array}\right)_n*$	On l'utilise pour la fabrication de Plexiglas

domaine des sports et loisirs on a cannes à pêche, les coques de bateaux, piscines, bandes magnétiques, DVD ; les emballage alimentaire (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait,

boîtes à œufs) ou industriel (flacons de détergents, sachets et sacs, casiers, sacs poubelles) ; Domaine de transports et en particulier l'automobile (boucliers, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, réservoirs d'essence) ; dans le domaine industrie électrique et électronique on trouve des boîtiers, gainage de câbles, façades de téléviseurs en l'industrie chimique on a les tuyauteries, cuves, revêtements ; aussi le domaine des bâtiment-travaux publics comme peintures, isolation, revêtement de sol, tuyauteries, géotextiles on ajout l'agriculture comme l'irrigation, arrosage, serres, bâches ; et finalement on l'hygiène: verres de lunettes, lentilles de contact, prothèses, matériel hospitalier (seringues, poches, tubes pour transfusion), couches [10].

I.1.6 rupture et déformation des polymères

Lorsqu'on parle de propriété d'un matériau, comme le polymère on se réfère à la façon dont il réagit à une sollicitation, on pourrait aussi la nommer une sensibilité à cette stimulation, ou bien son inverse, la stabilité et la résistance, et son objectif et leurs propriétés thermiques qui décrivent le comportement de ce matériau. Le développement structurale de ces types de polymères est lié directement à leurs propriétés (physiques, mécaniques...) dépendent elles-mêmes de la microstructure, qui mis ce matériau sujette à plusieurs défis et conséquences comme des contraintes multiples qui se traduisent par une altération lente et irréversible de ses propriétés se traduit de plusieurs manières différentes. La maîtrise de la microstructure générée lors de la mise en œuvre prend tout son intérêt si elle peut être reliée aux propriétés mécaniques du matériau [27].

Le comportement mécanique de cette classe de matériau présente donc deux températures caractéristiques, la température de transition vitreuse de la phase amorphe T_g et la température de fusion T_f de la phase cristallisée. On a donc : en dessous de T_g un polymère rigide de module d'Young voisin de celui des polymères amorphes vitreux ; entre T_g et T_f un matériau plus souple (module de l'ordre de 700 MPa) à cause de la phase amorphe caoutchoutique, mais avec une bonne résistance grâce à la présence des cristallites ; et au-dessus de T_f , un fluide visqueux ou viscoélastique.

Les courbes de la Figure I.6, obtenues en traction avec la méthode vidéo-métrique, montrent le comportement aux grandes déformations pour divers polymères amorphes et semi-cristallins (PEEK, PA6, PC, PVC, PP, PE, PTFE) à la température ambiante [28].

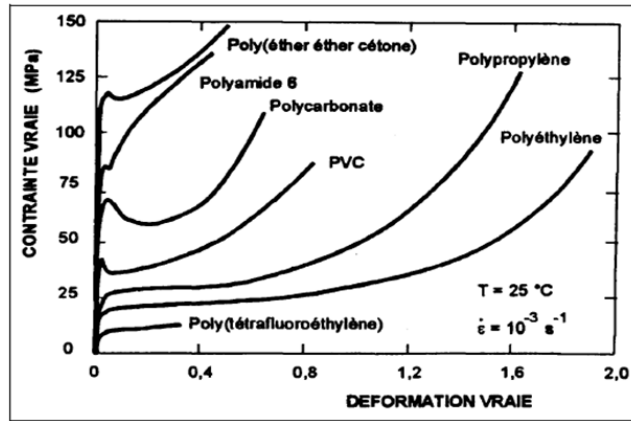
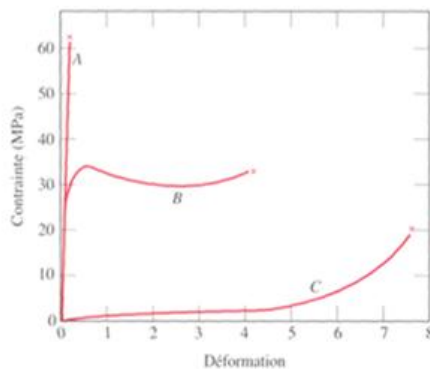


Figure I.6: Courbes contrainte vraie – déformation vraie de divers polymères
Obtenues à 25°C [28].

I.1.7 Propriétés des polymères

Les polymères sont des matériaux qui couvrent une large plage de propriétés (mécaniques, physiques, chimiques et optiques électriques...). Le choix de ces matériaux se fait en concurrence avec les autres classes de matériaux. (verres, céramiques, métaux..) [29].



- ☞ A. polymère fragile
- ☞ B. polymère plastique
- ☞ C. élastomère

Figure I.7 : Comparaison de différents types des polymères au fonction de contrainte - déformation [29].

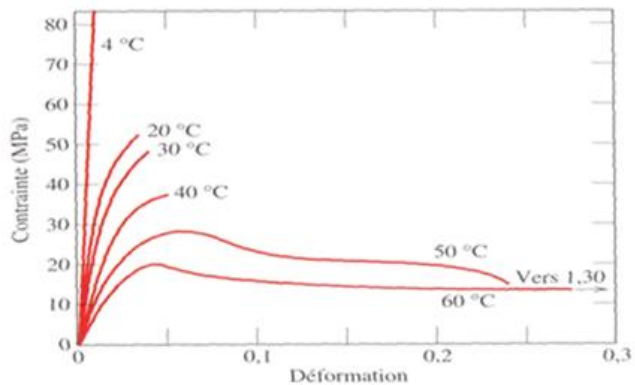


Figure I.8: Courbes contrainte-déformation du PMMA
A différentes températures [29].

Tableau I.4 Les caractéristiques de polymères courants

Polymère	Masse volumique (g/cm ³)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement à la rupture	Tg (K°)	Tf (K°)
PE(BD)	0.91-0.94	0.17-0.28	7-17	9-15	100-650	270	390
PE(HD)	0.95-0.97	0.55-1.10	20-37	25-35	10-1200	300	405
PVC	1.30-1.60	2.40-4.10	40-60	40-45	40-80	350	430
PTFE	2.15-2.20	0.40-0.55	17-35		200-400	400	600
PP	0.90-0.91	1.20-1.70	30-70	30-40	10-600	253	445
PS	1.04-1.05	2.30-3.30	35-70		1-3	370	
PMMA	1.17-1.20	2.25-3.25	50-90	55-75	2-6	378	500
Phénol-formaldéhy	1.24-1.32	2.80-4.90	35-65	-	1.5-2.0	-	-
Nylon6,6	1.13-1.15	1.60-3.80	75-95	45-85	15-300	340	520
PETP	1.29-1.40	2.80-4.10	50-70	60	10-300	345	530
PC	1.20	2.40	60-70	65	110-150	395	500
Polyesters	1.10-1.40	1.30-4.50	45-85	-	3-2300	340	-
Epoxydes	1.20-1.40	2.10-5.50	40-85	-	-	380	-
PiP	0.91	0.002-0.1	10	-	-	-	-

Les différences s'expliquent par l'état physique du polymère à température ambiante (vitreux, caoutchouteux ou viscoélastique), ainsi les polymères à l'état vitreux sont les plus fragiles et les caoutchoucs ont une assez bonne résilience car leur module de Young est très faible. Taux d'absorption des vibrations ($Tg\delta$) est loin d'être négligeable pour les polymères en générale test plus important encore pour les caoutchoucs [30]. La plupart des polymères sont de bons isolants (résistivité électrique $\approx 10^{20} \mu \text{ ohm cm}$) au niveau optique, la transparence des polymères dépend fortement de l'état structural comme le cas de des

polymères purs et non cristallins sont souvent transparents et les polymères semi-cristallins sont soit translucides soit opaques ; au niveau optique, la transparence des polymères dépend fortement de l'état structural les polymères purs et non cristallins sont souvent transparents et pour polymères semi-cristallins sont soit translucides soit opaques .

Pour la ductilité des polymères est très élevée avec le taux de déformation élastique très important pour les caoutchoucs (élastomères) [30].

Tableau I.5 : les valeurs la Résilience et ténacité des polymères.

Polymère	G_{IC} [kJ/m ²]	K_{IC} [MPam] ^{0.5}
Polyester non saturé	0.1	0.5
Epoxyde	0.1-0.3	0.5-1.0
PMMA	0.3-0.4	0.9-1.4
Polystyrène	0.3-2	0.6-2
Polycarbonate	3.5-8	2.6-3.8
Polyamide66	2-4	3
ABS/polystyrène	5	4
Polyéthylène (haute densité)	6-7	3-4
Polyéthylène (basse densité)	6-7	1
Polypropylène	8	3

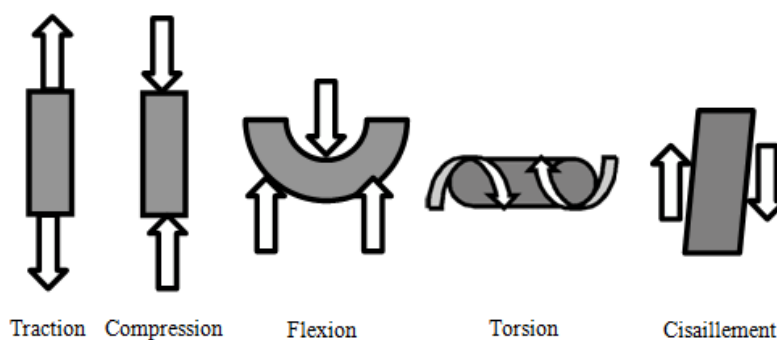


Figure I.9 : Différentes sollicitations mécanique d'un polymères [21].

I.1.8 Polymère solide amorphe et semi cristallin

Le polymère est dit amorphe si le désordre moléculaire est complet. Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et

l'orientation de celles-ci dans des zones submicroniques. Les chaînes sont enchevêtrées sous forme de pelotes statistiques (figure I.11). Les segments de chaînes sont capables de créer une certaine mobilité moléculaire si des espaces libres sont régulièrement distribués dans tout le volume du matériau [4].

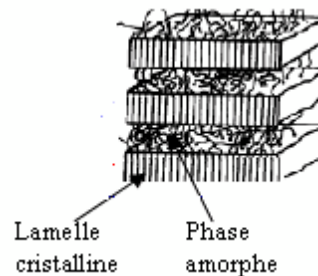


Figure I.10 : Structure d'un polymère semi-cristallin [4].

La figure I.9 montre la structure d'un polymère semi cristallin à différentes échelles. L'arrangement des chaînes macromoléculaires parallèlement les unes aux autres selon une périodicité donnée, forme des lamelles cristalline d'une épaisseur d'environ 10nm. L'épaisseur et la régularité de ces lamelles dépendent des conditions de cristallisation mais aussi de la rigidité de la chaîne, des ramifications et des défauts d'enchevêtrement [4,31].

Au cours de la cristallisation du polymère, les lamelles cristallines s'organisent pour former des sphérolites

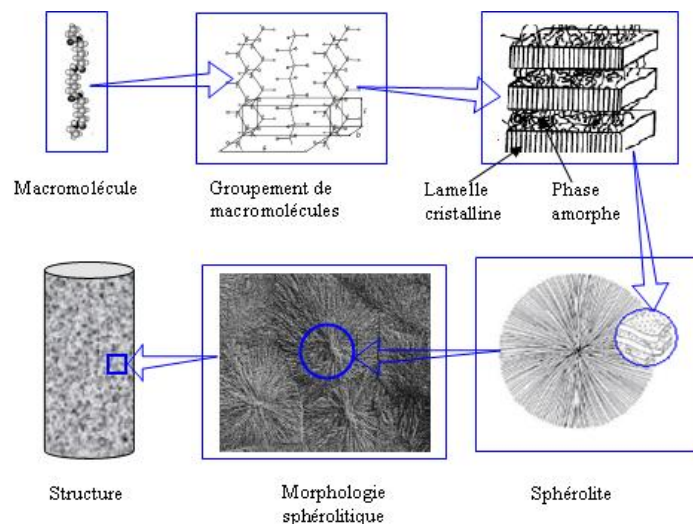


Figure I.11 : Représentation multi-échelle de la morphologie microstructurale des polymères semi cristallins [4]

La figure I.11 montre une telle morphologie dans le cas d'un grade de PEHD

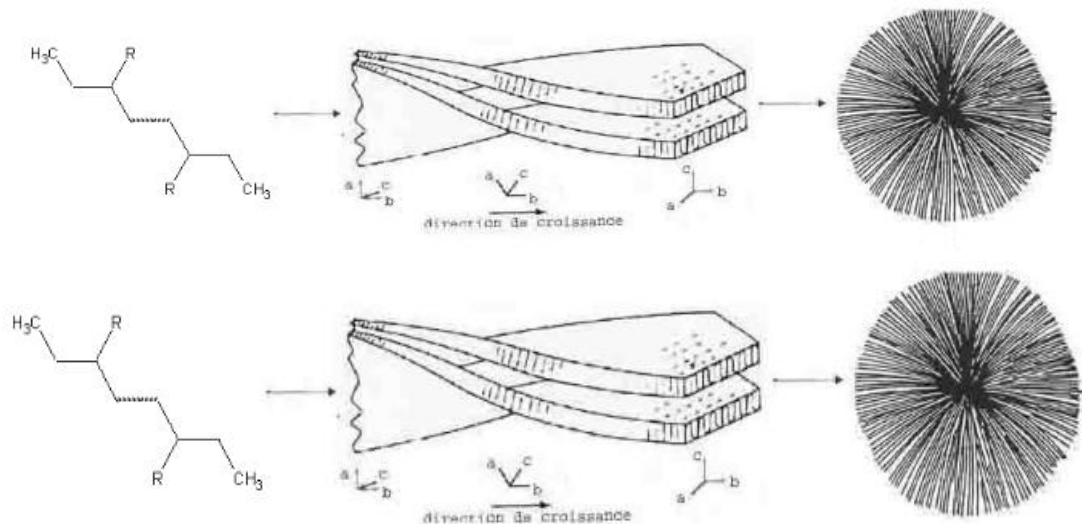


Figure I.12 : Différentes échelles d'organisation d'un polymère semi-cristallin :

(a) conformation de chaîne, (b) lamelles cristallines, (c) sphérolite [32].

Au cours du refroidissement depuis l'état liquide, le comportement des polymères semi-cristallins présente deux températures caractéristiques, la température de transition vitreuse de la phase amorphe (T_g) et la température de fusion (T_f) de la phase cristalline. On distingue alors trois domaines caractéristiques de température pour ces matériaux (tableau I.1). En dessous de (T_g) le polymère est rigide avec un module de Young élevé. Sa phase amorphe est à l'état vitreux car l'agitation thermique est insuffisante pour permettre le mouvement coopératif des molécules dans cette phase, entre T_g et T_f le polymère est plus souple avec un module de Young modéré. La phase amorphe est caoutchouteuse, un mouvement interne engendré par l'agitation thermique s'opère au sein de cette phase. Dans cet intervalle de température, les polymères semi-cristallins admettent des déformations importantes. Et finalement au dessus de la température (T_f), le polymère est à l'état liquide visqueux ou viscoélastique. Les chaînes apparaissent statistiquement indépendantes les unes des autres. La sollicitation pourra donc très facilement les déplacer les unes par rapport aux autres [4]

I.2 Le polyéthylène à haute densité (PEHD)

I.2.1 Introduction

Parmi les polymères semi-cristallins, le Polyéthylène à Haute Densité PEHD, a fait l'objet de nombreux travaux et est souvent considéré comme un matériau modèle pour l'étude du comportement mécanique. Le développement d'une loi de comportement efficace passe par la compréhension et la modélisation des phénomènes microstructuraux. Dans ce chapitre, on

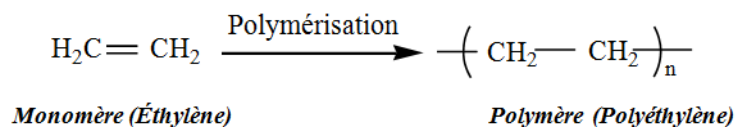
s'attachera donc à résumer et à rappeler le rôle que joue la microstructure sur le comportement mécanique, on s'intéressera notamment aux processus d'endommagement apparaissant aux grandes déformations [33].

I.2.2 Histoire de PEHD

Le polyéthylène haute densité est obtenu par des procédés de polymérisation de l'éthylène à basse pression, seul ou avec des cosmonomies. Les premières unités de production datent du milieu des années cinquante. La première fut construite en 1955 par la société Phillips au Texas. Ce fut ensuite Hoechst qui démarra la première unité selon le procédé Ziegler en 1956. Dans les années soixante, des améliorations furent apportées au procédé Ziegler par l'utilisation de catalyseurs superractifs permettant de supprimer la coûteuse opération d'élimination des résidus catalytiques [13].

Le polyéthylène, est un polymère thermoplastique. Il est le principal membre de la classe des polymères polyoléfinés. Il résulte du procédé de polymérisation de l'éthylène gazeux, un produit secondaire dans le gaz naturel et le pétrole brut. Parmi ses avantages, on trouve le coût qui est relativement bas, la flexibilité, la facilité d'installation, la fiabilité, la résistance à la corrosion et la durabilité. Actuellement, Il englobe sous cette appellation trois variantes de polyéthylènes largement utilisés, à savoir : Le polyéthylène basse densité : PEBD (en anglais, LDPE) ; Le polyéthylène basse densité linéaire PEBDL (en anglais, LLDPE) ; Le polyéthylène haute densité : PEHD (en anglais, HDPE) [13,34].

Formule chimique d'un polyéthylène PE [13]:



Aujourd'hui, plusieurs procédés sous haute et basse pression sont utilisés pour la production des différents grades de polyéthylène, on classe habituellement les PE selon leur masse volumique à 23 °C on a le PE haute densité (PEHD) est commercialisé dans une gamme de densité allant de 0,94 à 0,97. Sa cristallinité varie entre 60 et 80 % ; le PE moyenne densité (PEMD) est commercialisé dans une gamme de densité allant de 0,93 à 0,945. Sa cristallinité varie entre 40 et 60 % ; le PE basse densité (PEBD) est commercialisé dans une gamme de densité allant de 0,915 à 0,935. Sa cristallinité est inférieure à 40% [35].

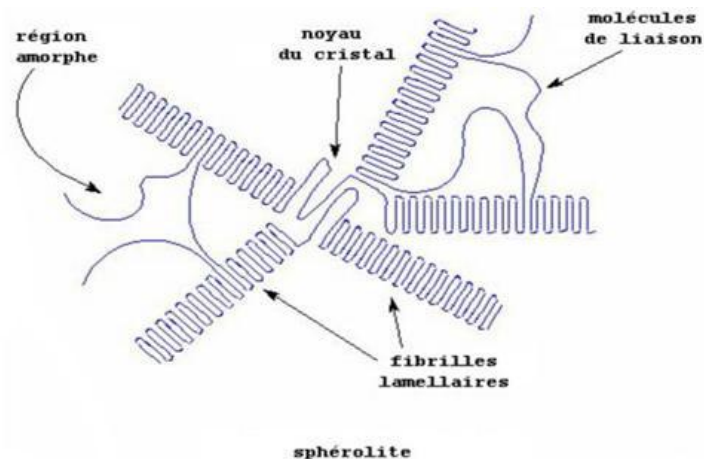


Figure I.13 : Présentation d'un sphérolite de polyéthylène [2].

I.2.3 Propriétés des polyéthylènes hautes densité

Chaque matériau possède des Propriétés, le cas du PEHD on trouve plusieurs caractéristiques, on note propriétés physiques les matériaux en polyéthylènes sont opaques en forte épaisseur et transparents en films. Pour une épaisseur donnée, la transparence augmente avec une diminution de la masse volumique. Celle-ci est également fonction de la taille moyenne des cristallites. Plus celle-ci est faible et homogène, plus la transparence est élevée à masse volumique donnée, la perméabilité aux gazes et aux liquides varie à l'inverse de la masse volumique et ainsi, le PEHD est à peu près quatre fois moins perméable que le PEBD. Pour les Propriétés mécaniques du PEHD à 23°C, les matériaux semi-cristallins sont au-dessus de leur température de transition vitreuse (environ - 120°C) ; leur phase amorphe est caoutchouteuse, ce qui affecte leurs propriétés mécaniques [2,13].

Les propriétés mécaniques sont améliorées si les macromolécules sont orientées dans le sens de l'effort par la technique de mise en œuvre choisie, masse volumique donnée, plus la masse molaire augmente, plus la ductilité (allongement à la rupture et contrainte à la rupture) est importante. Pour les Propriétés chimiques le PEHD possède une très grande stabilité chimique, il est pratiquement insoluble. Il n'est attaqué ni par les acides, sauf les oxydants, ni par les bases, ni par les solutions de sel, d'où son utilisation en vaisselle de chimie. Insoluble dans l'eau, reconnue pour son aptitude à des applications alimentaires, bouteilles de lait par exemple. Les polyéthylènes sont sensibles à l'état naturel à l'action des ultraviolets en présence d'oxygène, Pour pallier cet inconvénient, ils sont chargés de stabilisants (anti-oxydants, absorbant UV ...) [2, 13, 38] et aux Propriétés électriques et thermiques le PE présente d'excellentes propriétés d'isolation électrique quelles que soient sa masse

moléculaire et sa cristallinité. Sa faible permittivité relative et son faible facteur de dissipation diélectrique font de lui un matériau de choix en isolation électrique [13,40], en l'absence de contrainte, le polyéthylène haut densité peut supporter une température de 110 à 120°C (stérilisation par exemple). Ce comportement est caractérisé par la température de ramollissement Vicat (1kg) ou par la température de fléchissement sous charge qui augmente avec le taux de cristallinité ou le niveau de réticulation [2, 13, 39].

Tableau I.6 : Propriétés mécaniques et thermiques de polyéthylène [27].

Propriété	PEBD	PEHD
Masse volumique (g/cm^3)	0.91–0.94	0.95–0.98
Module de Young (20°C,100s)(GPa)	0.15–0.24	0.55–1.00
Résistance à la traction(MPa)	7-17	20-30
Ténacité (20°C)($\text{MPa m}^{1/2}$)	1-2	2-5
Température de transition vitreuse T_g (°K)	270	300
Température de ramollissement T_s (°K)	355	390
Chaleur massique ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	2250	2100
Conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	0.35	0.52
Coefficient de dilatation thermique(MK^{-1})	160-190	150-300

Tableau I.7 : Caractéristiques majeurs des différentes familles des polyéthylènes [2].

Type de	Masse volumique	Taux de cristallinité	Température De fusion(°C)	Température de transition vitreuse (°C)	Module d'Young en traction (MPa)
PEBD	0,915 - 0,935	41 - 58	95 - 117	-133 à -103	120 - 135
PEM	0,930 - 0,945	55 - 65	125 -130	-	350 - 800
PEHD	0,945 - 0,970	65 - 80	130 - 138	-120	800 - 1300

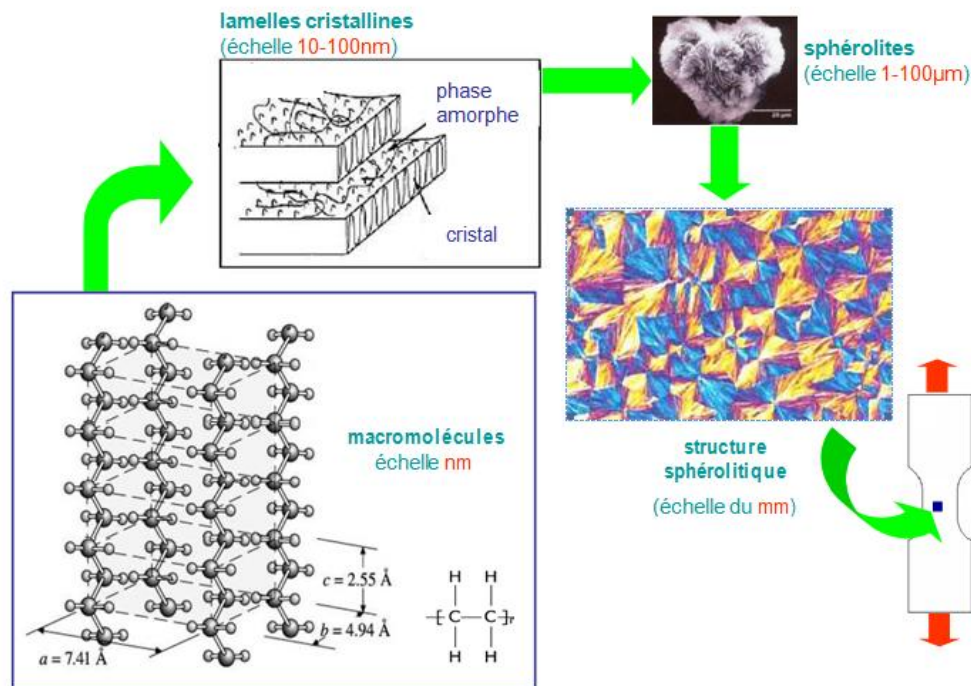


Figure I.14 : Représentation multi-échelle de la structure du PEHD semi-cristallin : passage de la structure cristalline (maille orthorombique) à l'agrégat sphérolitique et échelles correspondantes [33].

I.2.4 Domaines d'application du PEHD

Le polyéthylène est le polymère de synthèse le plus employé. Il compose notamment la moitié des emballages plastiques (films à usage alimentaire, agricole...). L'utilisation la plus visible du polyéthylène est les sacs plastiques [36], est utilisé pour fabriquer des bouteilles a lait, jus, eau et produit a lessive, des contenants a céréales, des futs et d'autres contenants pour divers produits chimiques ménagers ou industriels, des sacs à ordures ou d'épicerie, des caisses et casiers réutilisables, des bouchons vissés ou encliquetés, des jouets, équipements sportifs, et beaucoup d'autres produits et emballage [37]. Les principales applications du HDPE sont des produits rigides : flacons (détergents, Cosmétiques...), bouteilles, boites type Tupperware, jerricans, réservoirs de carburant d'automobiles, etc. Les principales applications du LDPE sont des produits souples : sacs, films, sachets, sacs poubelles, récipients souples (ketchup, crèmes hydratantes etc...), Pour la Fabrication de gaines de câbles, on le trouve dans les équipements sportifs (ski, snowboard, surf, cerfs-volants, etc...), le matériel de protection, notamment balistique

(gilets pare-balles) ou moto (tenues à haute résistance à l'abrasion), les implants chirurgicaux, les plaques pour remplacer la glace des patinoires etc....Son coût est très supérieur à celui des autres polyéthylènes [36].

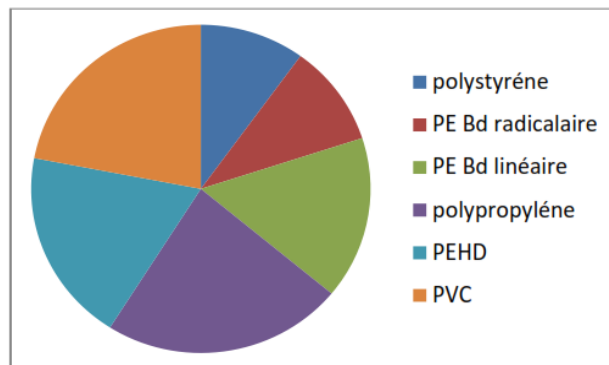


Figure I.15 : Partitions des thermoplastiques dans le monde

[36].

I.2.5 Avantages et inconvénients du PEHD

Les avantages du PEHD sont : mise en œuvre aisée- Excellentes propriétés d'isolation électrique-résistance aux chocs-grande inertie chimique- qualité alimentaire-perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux hydrocarbures ; de coté des inconvénients du PEHD sont comme suit : Sensibilité aux UV en présence d'oxygène- Sensibilité à la fissure sous contrainte - mauvaise tenue à la chaleur -collage important [2] .

I.2.6 Vieillessement des polymères

Le vieillissement correspond à une évolution lente et irréversible d'une ou de plusieurs propriétés du matériau à partir d'un point de référence, généralement pris dès la fin du cycle de fabrication. Cette évolution peut résulter de modifications de la structure des macromolécules qui assurent leur cohésion mécanique, de leur composition ou de sa morphologie. Les différents mécanismes responsables du vieillissement des polymères peuvent être classés en deux grandes catégories : physique ou chimique. Ce type de vieillissement correspond à tout processus conduisant à une modification des propriétés d'utilisation du matériau sans qu'il y ait modification de la structure chimique de ce dernier [13]. Il englobe les phénomènes de vieillissement sous contrainte mécanique, les phénomènes de relaxations, les phénomènes liés au transfert de masse (pénétration de solvants (Figure), migration d'adjuvants) et les phénomènes de surface; et le vieillissement

chimique correspond à tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau sous l'influence de son environnement d'usage, ce vieillissement chimique comprend premièrement le vieillissement thermochimique qui correspond à tout vieillissement chimique en atmosphère inerte (thermolyse) ou dans l'air (thermo-oxydation), Pour le cas particulier de la dégradation à des températures très élevées, on parle de pyrolyse ; le deuxième est le vieillissement photochimique c'est-à-dire le vieillissement résultant de l'exposition directe au rayonnement solaire. L'acte primaire de tout processus photochimique est l'absorption d'un photon. Pour troisième, le vieillissement hydrolytique s'accompagnant d'une hydrolyse, entraîne des coupures statistiques des chaînes macromoléculaires du polymère, d'où une altération, à terme, des propriétés mécaniques. La réaction est généralement très lente à température ambiante, la vitesse de l'action chimique élémentaire étant elle-même faible et le processus étant le plus souvent contrôlé par la diffusion (également lente) de l'eau dans le matériau ; le quatrième est le vieillissement radiochimique par des radiations ionisantes de forte énergie (X , α , β , γ , neutrons).

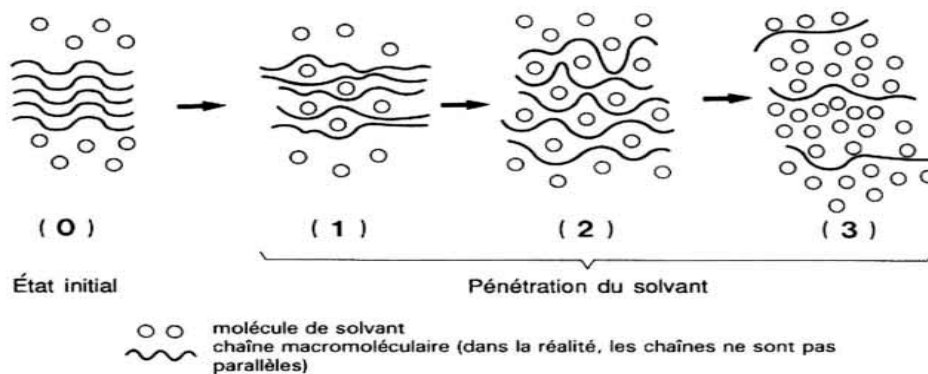


Figure. I.16 : Schématisation de la pénétration d'un solvant dans un polymère [13,42].

D'autres types de vieillissement chimique peuvent exister, on peut citer par exemple le vieillissement en milieu réactif, le vieillissement biochimique, le vieillissement sous contrainte mécanique conduisant à des coupures de chaînes (mécano-chimique), etc. Les processus communs à tous les types de vieillissement chimique, sont comme suit : Les coupures statistiques des chaînes, la réticulation et les réactions de dépolymérisation [13]. On outre vieillissement à la lumière où le PEHD est sensible au rayonnement solaire, plus particulièrement dans le domaine ultraviolet (UV). Après une exposition prolongée, le vieillissement se traduit par une baisse de la résistance au choc et de l'allongement à la rupture; la teinte peut être altérée. Notons que les effets du vieillissement sur les propriétés mécaniques sont moins sensibles dans le cas d'objets à parois épaisses. Une stabilisation bien

étudiée en fonction de la durée d'exposition des objets et de l'intensité du rayonnement permet, par incorporation d'agents anti ultraviolet (UV) dans le polymère, d'obtenir une importante amélioration de sa résistance à la lumière. L'addition de noir de carbone bien dispersé est encore plus efficace et permet d'allonger la durée de vie du PEHD [41].

I.2.7 Micro mécanismes d'endommagement de déformation et des polymères semi-cristallins

Les mécanismes de la déformation plastique dans les polymères semi-cristallins sont succinctement décrits en considérant successivement la phase amorphe, la phase cristalline, et plus spécifiquement les sphérolites. Des travaux récents suggèrent plutôt un mécanisme de « détricotage » de la phase cristalline provoqué par la phase amorphe, les mécanismes de déformation des polymères semi-cristallins sont étroitement liés à la présence des deux phases, amorphe et cristalline. A température ambiante, la phase amorphe des polymères semi-cristallins peut être à l'état vitreux, comme c'est le cas pour les polyamides (Nylon) et les Polyéthylènes Téréphtalates, ou à l'état caoutchoutique, comme pour le PEHD et le Polypropylène, la phase amorphe d'un polymère comme le PEHD libre et liée, est caoutchoutique. Son rôle mécanique se réduit donc à la transmission des contraintes d'une cristallite à l'autre par l'intermédiaire de molécules liantes confèrent à l'état amorphe une certaine résistance. En outre, les macromolécules constituant la phase amorphe liée sont à l'origine de la création d'une force de retour vers l'état non déformé. Les deux mécanismes de déformation que sont le glissement inter lamellaire résultant du glissement des cristaux lamellaires parallèlement les uns aux autres sous l'effet des contraintes appliquées ; la phase amorphe est donc cisailée, et le second mécanisme de la séparation inter lamellaire résultant des contraintes de traction ou de compression perpendiculaires à la plus grande surface des lamelles, et se traduisant par une variation de la distance entre les lamelles ; dans ce cas les chaînes amorphes sont étirées ou compressées la contrainte nécessaire à l'activation de ce mécanisme de séparation est assez élevée, à cause de la faible épaisseur de la couche amorphe. En traction, ce phénomène peut être l'origine de la création de cavités inter lamellaires, le glissement, qui est le mécanisme microscopique de déformation plastique le plus fréquent pour le PEHD se produit naturellement lorsque la cession dans le plan de glissement atteint une valeur critique les processus de cavitation du PEHD sous une traction uni axiale à température ambiante [33].

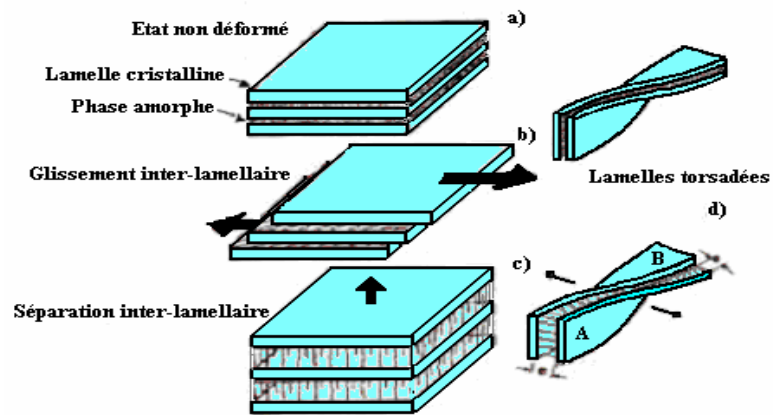


Figure. I.17. Micromécanismes de déformation de la phase amorphe dans un polymère semi-cristallin [33].

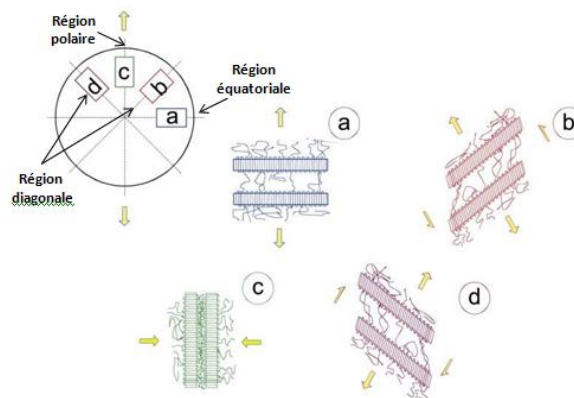


Figure I.18: Régions d'arrangement des lamelles cristallines dans les sphérolites [43].

La déformation du polymère au niveau macroscopique, on observe qu'une éprouvette de polymère semi-cristallin se déforme en traction par le développement et la propagation de la striction, Selon la littérature, l'endommagement peut être défini au sens large comme la création de surfaces de décohésion au sein du matériau l'étude de l'endommagement des polymères semi-cristallins est rendue complexe par l'hétérogénéité de leur structure, joue un rôle très important sur le comportement mécanique et surtout sur les propriétés élastiques, un signe de cavitation pour le PEHD se manifeste par un blanchiment soudain du matériau près de la limite d'élasticité. Etant donné que l'endommagement est dû à la formation d'un certain nombre de micro vides dans le matériau, il s'accompagne d'une variation de volume. la plupart des polymères présente de multiples propriétés mécaniques : fragiles à basse température, ils deviennent plastiques[33], une des caractéristiques les plus remarquables des

thermoplastiques semi-cristallins est leur faculté à subir une grande déformation plastique avant la rupture à température ambiante. Ce phénomène provient en partie du fait que leur température de transition vitreuse (-100°C pour le PE) est située bien au dessous de la température ambiante [32]. Au voisinage de la température ambiante, le PE présente deux modes de rupture : sous forte contrainte il cède d'une manière ductile pour des temps courts, alors que dans le domaine des contraintes faibles il cède de manière fragile pour des temps beaucoup plus longs. La rupture ductile de tubes de PE se caractérise par la formation d'une « hernie » qui se fissure rapidement de façon perpendiculaire au sens d'étirage, suite à la forte déformation plastique comme indiqué sur la Figure I.18 (a) [32].

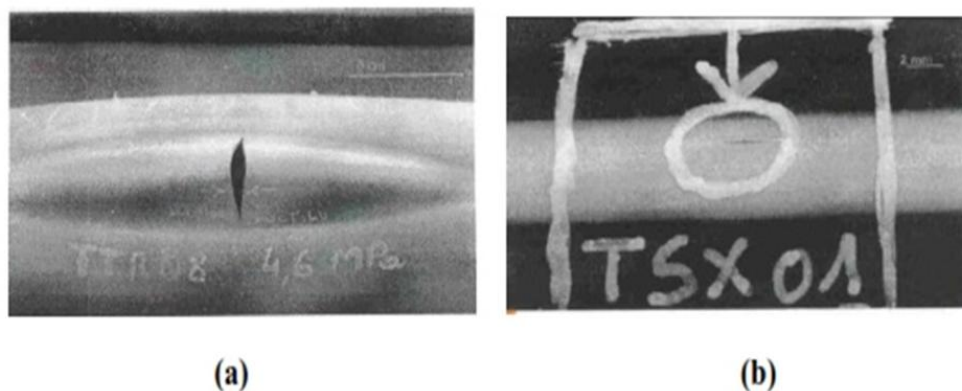


Figure I.19: Rupture de tubes de PE sous pression hydrostatique (a) ductile (b) fragile [43].

I.2.8 D'autres Comportements

Ils existe plusieurs Comportements (comme le Comportement au feu et le phénomène de perméabilité, corrosion ,résistance a l'abrasion ...), le polyéthylène haut densité s'enflamme vers 340°C en présence d'une flamme , Sa température d'auto-ignition est d'environ 350°C . La combustion s'entretient d'elle-même si la concentration en oxygène de l'air ambiant est supérieure à 17 %. En plus du dioxyde de carbone et de l'eau, le polyéthylène haut densité dégage, dans des conditions de combustion incomplète, de l'oxyde de carbone, des hydrocarbures aliphatiques ou aromatiques et différents produits oxygénés[4], et pour le cas de La Perméabilité le PEHD a une perméabilité relativement importante aux gaz tels que le dioxyde de carbone et l'oxygène, aux arômes et à certains liquides ; par contre, par son caractère hydrophobe, il a peu tendance à fixer l'eau et sa perméabilité à la vapeur d'eau est faible. La grande perméabilité du PE-HD aux vapeurs de certains produits tels que les solvants aliphatiques, aromatiques et chlorés s'explique par la solubilité de ces

produits dans le polyéthylène. Dans le domaine de l'emballage, quand un produit conditionné doit être protégé de l'oxydation, ou pour éviter la diffusion de certains de ses constituants et arômes, les techniques d'enduction ou de co-extrusion du PE-HD avec des matériaux très imperméables peuvent être envisagées. Elle diminue lorsque le taux de cristallinité augmente et quand la température diminue [14].

Pour la Résistance à l'abrasion on a la surface paraffinique du polyéthylène lui assure un faible coefficient de friction. Les tubes en polyéthylène ont ainsi une excellente résistance à l'abrasion. Par rapport aux autres tubes traditionnellement utilisés dans le domaine du transport de l'eau, l'utilisation de tubes en polyéthylène permet d'augmenter considérablement la durée de vie des canalisations vis-à-vis de l'abrasion. Les conduites peuvent être utilisées dans de nombreux cas où l'abrasion est un problème important (transport d'eaux chargées en sable ou en gravier). puis la Corrosion où le PE est inerte chimiquement, pour pratiquement tous les usages, à l'intérieur de sa plage de température d'utilisation. Il est imputrescible, il ne rouille pas, ne se pique pas, ne se corrode pas. De ce fait, son épaisseur n'est modifiée par aucune corrosion chimique ou électrique provenant du milieu environnant [45]. La résistivité des terrains, quel que soit son niveau, n'a pas d'effet sur les tubes et les raccords constituant le réseau en polyéthylène.

De même, il est totalement inerte vis-à-vis des courants électriques vagabonds générés par l'activité des transports en commun ou par les industries. Les réseaux PE installés supportent sans conséquences l'exploitation d'un réseau tramway. La ductilité inhérente au PE permet aux conduites d'absorber les impacts, les vibrations et les contraintes causées par les mouvements de sol. La propriété de flexibilité et l'aptitude à se déformer sans dommage permanent permettent en outre aux conduites d'être cintrées dans le cas de tracés difficiles ou de changement de direction. Leur aptitude à s'adapter aux mouvements du sol est particulièrement intéressante dans les terrains potentiellement instables, telles que des zones comblées récemment, au-dessus de carrières ou encore des zones sismiques [45].

I.2.9 paramètres influençant sur la déformation du PEHD

Parmi les paramètres influençant sur la déformation du PEHD on trouve la vitesse de déformation et de la température sur le PEHD, les propriétés des matériaux polymères sont très sensibles que celles des métaux aux influences extérieures [22]. Les figures I.19 représentent des courbes réelles (contrainte- déformation) d'un PEHD soumis à des essais de traction sous l'influence de la vitesse de déformation et de la température T. Les propriétés du matériau utilisé

sont : une densité = 0,962 g/cm³, température de transition vitreuse T_g= -125 °C, température de fusion T_f = 135 °C et un taux de cristallinité = 75% [44].

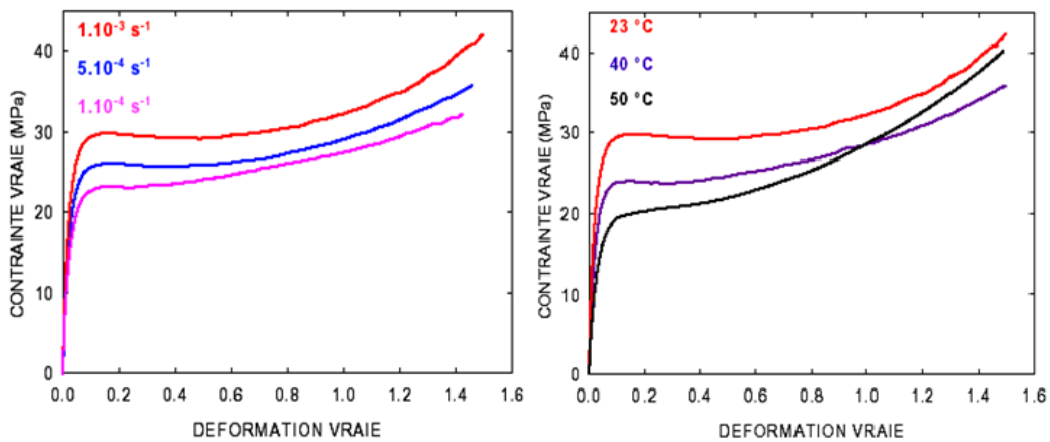


Figure I.20 : Courbes contrainte-déformation vraies d'un (PEHD) [44] :

- (a) pour différentes vitesses de déformations
- (b) pour différentes températures.

et l'influence de la température sur la contrainte à la limite élastique et le module d'Young la contrainte à la limite d'élasticité (R_e) décroît linéairement pour une augmentation de la température d'essai T d'un PEHD lors de traction [44].

Tableau I.8 : la contrainte élastique (R_e) en fonction de la température T. [44].

T (°C)	R _e (MPa)
21	19.65
50	12.37
60	10.22
70	8.46
80	7.27

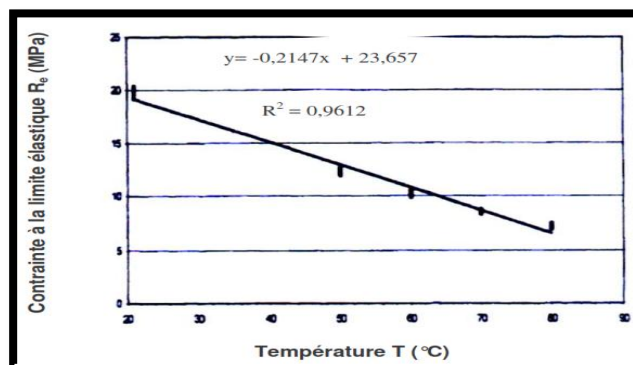


Figure I.21: Variation de la contrainte à la limite élastique (R_e) En fonction de la température T [41].

I.2.9.1 Les additifs

Les additifs sont des matières qui, ajoutées à un polymère, modifient ses propriétés ou ses caractéristiques. Il existe une grande variété d'additifs pour une multitude de fonctions : développer ou étendre les propriétés des thermoplastiques, améliorer leur transformation, modifier leur aspect ou augmenter leur résistance à l'environnement extérieur. Cette action sur les caractéristiques et les propriétés des emballages thermoplastiques s'opère de plusieurs manières: ils peuvent apporter une protection contre les rayons ultraviolets et l'oxygène pour étendre la durée de vie du produit ; ils peuvent aussi faciliter le processus de fabrication du polymère et améliorer l'apparence de l'emballage et par extension l'attractivité du produit. Deux principales classes d'additifs sont à prendre en compte : les stabilisants et les adjuvants technologiques comme montre le tableau (I.9)

Tableau I.9 : Principaux types d'additifs utilisés les matériaux plastiques [13]

Type de molécules	Effet recherché	Nature des molécules	Taux usuels
Antioxydants	Contre-vieillessement et oxydation (O ₂ , O ₃)	Dérivés phénoliques, amines aromatiques	< 0,5%
	Empêcher ou retarder la dégradation	Benzophénones, benzotriazoles, complexes organométalliques	< 5%
	Spécifique : tenue choc, thermique,		

Les stabilisants ces additifs permettent de conserver les propriétés physico-chimiques des polymères au cours du temps en réagissant à la place du polymère. Ils s'opposent au vieillissement, c'est-à-dire inhibent ou retardent le processus responsable des altérations de la structure pendant la mise en œuvre ou l'utilisation des matériaux. On distingue deux principaux types des stabilisants : les stabilisants UV et les antioxydants.

Les stabilisants UV est la cause principale de la dégradation par photo-oxydation des matériaux plastiques est la présence d'impuretés ou de groupements chromophores dans le polymère. Le mécanisme de protection des stabilisants UV est basé sur l'absorption de la radiation UV dangereuse et ensuite sa dissipation par exemple sous forme de chaleur.

Les stabilisants UV les plus communs sont les 2-hydroxy benzo phénones, les 2 hydroxy phenyl benzo triazoles et des composés organiques à base de nickel et des amines, et les

antioxydants où le PE peut être stabilisé par une grande variété d'antioxydants. Ces derniers sont généralement classés selon leur mécanisme d'action ou selon leur température de fonctionnement dont les antioxydants agissant à haute température sont appelés antioxydants de mise en œuvre. Il s'agit, principalement, des phosphites organiques et des composés organo-soufrés ; et les seconds antioxydants à large gamme de température sont également désignés par le nom d'antioxydants de fonctionnement. Ils garantissent la durée de vie de la pièce. Les plus courants sont les phénols encombrés et les amines secondaires aromatiques ; puis Les troisièmes antioxydants fonctionnant à basse température sont les plus efficaces à température ambiante en présence d'un rayonnement lumineux (par exemple sous rayonnement UV). Il s'agit principalement des amines encombrées plus couramment appelés HALS (Hindered Amine Light Stabiliser). Le nom, la fonction chimique et les propriétés physiques de quelques antioxydants commerciaux, les antioxydants sont peu solubles dans les matrices polymères. C'est pourquoi, dans le PE, leur pourcentage n'excède guère 1,0% massique [13].

I.2.10 Conditions d'usinage du PEHD

Les matériaux d'outils, peuvent être en acier rapide qui a le coût le moins cher à l'achat. Ils ont une durée de vie moins longue, surtout avec les matériaux renforcés de fibre de verre. Ou de carbure, qui a la plus grande résistance à l'abrasion que les aciers rapides et il est d'un bon rapport prix/usure. Pendant l'usinage, Parfois le refroidissement n'est pas nécessaire. C'est le cas de certain usinage de matières plastique à faible coefficient de frottement, par exemple polyéthylène. La précaution essentielle consiste à éviter toute déformation. Il faut penser aussi que l'effort d'usinage est inférieur à celui nécessaire pour usiner une pièce similaire en acier ; il n'est donc pas nécessaire de serrer la pièce avec le même effort. Ce qui nous a pousser d'utiliser des montages spéciaux. Les mesures des cotes doivent toujours être effectuées après retour de la pièce à la température ambiante. Une tolérance de 0.1 à 0.2% de la cote nominale est accessible sans précautions spéciales [28].

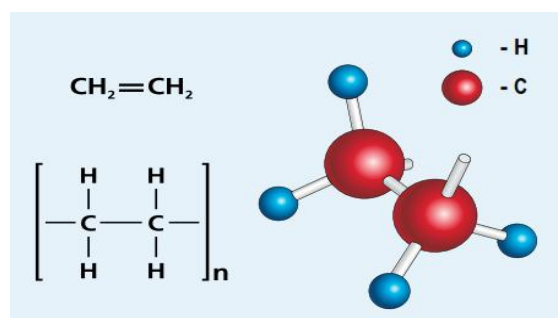


Figure I.22: représente molécule polyéthylène [45].

I.2.11 Mise en œuvre du PE

La matière de base servant à la fabrication Des produits en polyéthylène est un granulé que l'on obtient à partir de dérivés de naphte mis sous haute pression et haute température afin d'extraire l'éthylène. Cette valeur est communément appelée Minimum Required Strength (MRS) ou "contrainte minimale requise". Elle est exprimée en mégapascal (MPa), en appliquant à la valeur du MRS un coefficient de sécurité égal à 1.25 pour l'eau, on définit une contrainte de référence de la résine, appelée aussi contrainte hydrostatique à long terme. Cette valeur est généralement appelée "sigma" (σ). Elle garantit une durée de vie minimale de 50 ans pour des tubes sous pression transportant l'eau à 20°C [45]. Pendant la mise en œuvre, le polymère est mélangé à différents produits (stabilisants, lubrifiants, plastifiants, charges..) pour élaborer une formulation qui se présente le plus souvent sous forme de poudre ou de granulés. Cette formulation est ensuite fondue (cas des polymères semi- cristallins ou plastifiés (cas des polymères amorphes), à la fois par conduction thermique depuis les parois de l'outillage de mise en forme et par dissipation d'énergie mécanique. Cette matière thermoplastique très visqueuse est ensuite forcée dans un outillage qui va donner une première forme au produit (tube, film...), elle est ensuite mise en forme et alors refroidie, dans certain cas étirée ou bi-étirée, pour obtenir le produit final. De ce processus de mise en forme, des paramètres d'étirage et de refroidissement vont dépendre la structure cristalline du polymère et de l'orientation de la phase amorphe. Etant donné leur faible conductivité thermique et leur viscosité élevée, les matériaux polymères ne se laissent pas mettre en œuvre comme des matériaux traditionnels. Il faut en effet provoquer leur fusion, puis les mettre sous une pression suffisante pour pouvoir les forcer au travers des outillages de mise en forme [28].



Figure I.23: matière première de production de polyéthylène [45].

Les machines d'extrusion (figure I.21) sont des équipements de mise en œuvre les plus utilisés

et au travers desquelles, la plus grande quantité de matières thermoplastiques est mise et forme. Les éléments actifs de ces machines sont une ou plusieurs vis enfermées dans un Foureau, dont la température peut être contrôlée par des éléments chauffants et refroidissants. Ces vis sont entraînées par un moteur électrique (parfois hydraulique) à vitesses variables au travers d'un réducteur et d'un dispositif d'accouplement. L'extrusion est une technique de fabrication continue de feuilles, de plaques, de tubes et de profilés. La matière plastique est introduite, sous forme de poudre ou de granules, dans un cylindre chauffé. A l'intérieur de celui-ci tourne une vis sans fin assurant le transport et l'homogénéisation de la masse fondue. Cette masse plastique est ensuite pressée à travers une matrice d'extrusion ou une filière, qui donne la forme finale à la section de l'extrudât, le produit extrudé est refroidi puis coupé en longueur [28].

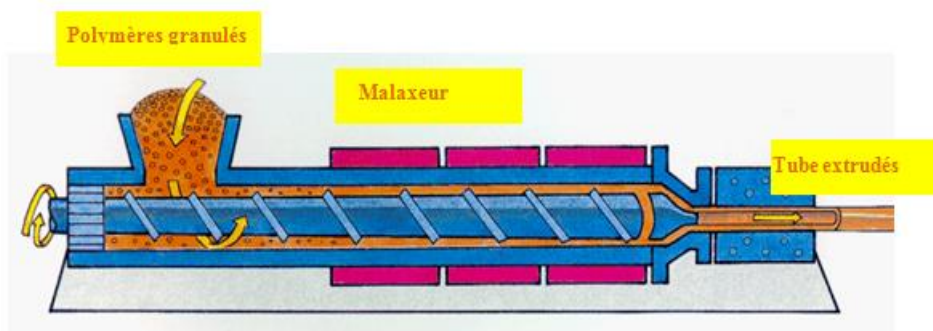


Figure I.24: Représentation d'une machine d'extrusion des tubes [28].

Le PEHD peut être transformé par d'autres techniques :

- * Extrusion de films par technique "Chill – Roll";
- * Production de fils et de fibres à partir de film extrudé – soufflés (fibrillation) ;

*Production de fils par filage [28].

Conclusion

Nous avons donné dans ce premier chapitre un aperçu global un état d'art sur les polymères et en particulier le polyéthylène haute densité PEHD, permettant de situer l'importance de ces matériaux dans divers domaines technologiques ; Les notions théoriques de base ont été présentées et la mise en œuvre de ce type de polymère.

Bibliographie

- [1] Fatima SEMDANI, étude de l'influence de la nature du cristal liquide sur les diagrammes de phases de type PDLC, Thèse de Magistère en physique université de Tlemcen ; juin 2010
- [2] METHIA Akli et REZZOUG Mohamed Amine; Etude de la diffusion de l'irganox 1076 ans un polymere recyclé à base de PEHD , Mémoire de master, université Bejaia ; juillet 2017
- [3] Colasapoil.free.fr/polymères/cours polymères-Staniek.pdf : les Cours polymères.pdf consulté le 22.02.2014
- [4] HACHOUR Kamel ; Contribution à l'élaboration d'un critère de plasticité pour le PEHD, Thèse de doctorat en génie mécanique, université de Tizi-ouzou, 2014.
- [5] Matthieu Zinet ; Modélisation de la cristallisation des polymères dans les procédés de plasturgie : quantification des effets thermiques et rhéologiques, Thèse INSA de Lyon, France juillet 2010
- [6] J. C. Richer, Compendium de terminologie chimique, Technique et Documentation, Paris (1999).
- [7] IUPAC, Définitions de base en terminologie des polymères et nomenclature des polymères organiques monocaténaires (traduction de la Commission « Enseignement » du GFP.), Makromol. Chem. 180, 9 (1979)
- [8] D.A. Tomalia, J. M .J. Fréchet. *Dendrimers and other Dendritic Polymers*; Wiley, New York, (2001).
- [9] F. Moingeon, Synthèse de polymères dendronisés par polymérisation anionique , thèse de doctorat ; option chimie; Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2006.
- [10] P. Wiess, la chimie des polymères, Support de Cours, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, (2010).
- [11] BENSALD Mohamed Ouassini ; Étude Des Polymères Par Dynamiques Moléculaire, thèse de doctorat en sciences ; Université d'Oran juin 2015
- [12] P.J. Flory. « Principles of Polymer Chemistry»; Ithaca, NY: Cornell University Press, 1953.
- [13] Ait-Zoura Ali et Chikbouni Sala; Modélisation de l'influence d'une charge minérale et d'un cycle de recyclage sur la diffusion de l'irganox 1076 dans un emballage alimentaire à base de polyéthylène haute densité, thèse de master génie de procédés ,université de Bejaia. Juillet 2017

- [14] E. Buhleier, W. Wehner, F.ogtle, „Synthesis, Cascade and Nonskid-Chain-Like Syntheses of Molecular Cavity Topologies, Synthesis, 2, 155-158, 1978
- [15] Laurent Duranel, Développement polyoléfines – Europe, Total Petro-chemicals, Colloque, «Activités Humaines et Pollutions », Académie de Versailles, 2011.
- [16] M. Dupeux, Aide-mémoire Science des matériaux, Editions Dunod, (2004).
- [17] C. Paris, Etude et Modélisation de la Polymérisation Dynamique de Composites à Matrice Thermodurcissable, thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2011).
- [18] R. Perrin, J. P Scharff, Chimie industrielle, Dunod, 2ème Ed (1999).
- [19] J. P. Arlie, Caoutchoucs synthétiques. Procédés et données économiques. Editions Technip, (1980).
- [20] S. Jouenne, Thèse de Doctorat ; option chimie et physicochimie des polymères; Université Pierre et Marie Curie, paris, 2005.
- [21] Abdoulaye SEYNI ; Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage, thèse de doctorat, université de Toulouse, décembre 2008
- [22] cours de chimie exclusifs : Généralité sur les polymères. Propriétés, synthèses, polymérisations, <http://polymeres.chimie-sup.fr/>consulté le 01.03.2014
- [23] Florian GEHRING ; Etude expérimentale du comportement de polymères thermoplastiques renforcés:Polypropylène chargé de fibres de chanvre. Approche Expérimentale et Modilisation, Thèse de doctorat en Génie mécanique et Energétique, université de Lorraine, Mars 2013
- [24] Michel Fontanille et Yves Gnanou; Chimie et physico-chimie des polymères ; 3eme Edition Pdf par Dunod, juin 2014- France
- [25] H. H. Kausch, Ed. Crazing in Polymers, In Advances In Polymer Science 52/53, British Polymer Journal (1983).
- [26] M. Carrega, Ingénieur Ecole Polytechnique, Les polymères De La Molécule A l’objet, EDP. Sciences (1999).
- [27] David JAUFFRÈS ; Polymères à hautes performances mécaniques élaborés par Compaction Grande Vitesse: mécanismes de frittage et relation Procédé./microstructure/propriétés Mécaniques, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon – France, Décembre 2007.
- [28] Alimi latifa ; Comportement Mécanique et Rupture du HDPE Sous Environnements Contrôles.Thèse de magister, Université d’ANNABA- Algérie, 2007

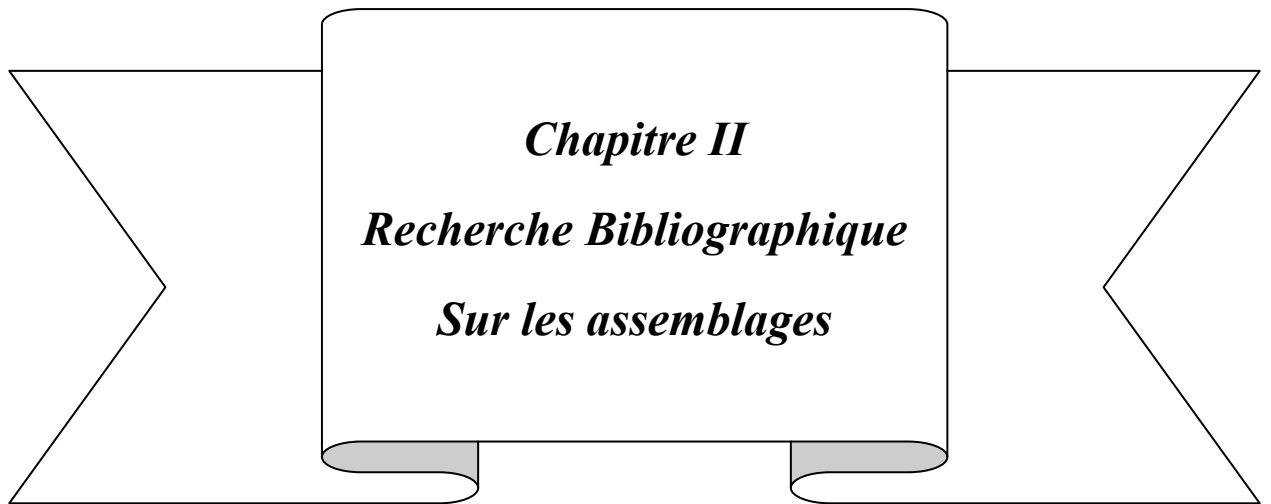
- [29] Philippe Galez ; Structure et propriété des matériaux : polymères et composites. IUT Annecy Département Mesures Physiques MPh2– spécialité MCPC Mesures Physiques Annecy–Polymères et composites- 2011
- [30] J. Lecomte-Becker; Partie Polymères «Propriétés mécaniques ». Cours de Physique des matériaux: www.metaux.ulg.ac.be/Fichierpourtelech/polym/ch%20.pdf, Consulté le 7/11/2014.
- [31] K. Hachour, F. Zaïri, M. Naït-Abdelaziz , J.M. Gloaguen , M. Aberkane ,J.M. Lefebvre Experiments and modeling of high-crystalline polyethylene yielding under different stress states. *Int. J. Plasticity*, 54:1–18, 2013.
- [32] Julien CAZENAVE ; Sur le compromis rigidité/durabilité du Polyéthylène Haute Densité en relation avec la structure de chaîne, la microstructure et la topologie moléculaire issues de la cristallisation. Thèse de doctorat Ecole doctorale matériaux de Lyon- France; 17 mai 2005.
- [33] Rida ARIEBY ; Risat Caractéion mécanique et modélisation thermodynamique du comportement anisotrope du polyéthylène à haute densité. Intégration des effets d'endommagement pour l'obtention du grade de , Thèse de doctorat université de Lorraine . 14/11/2007
- [34] Société Française de Chimie ; Le polyéthylène. <http://www.sfc.fr/donnees/mater/pe/cadpe.htm>.
- [35] I. Mkacher ; Vieillissement thermique des gaines PE et PVC de câbles électriques, Thèse de doctorat en Mécanique et Matériaux, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012.
- [36] ATMANI Abderaouf ; comportement mécanique en traction monotone d'un polymere associe au carbonate de calcium (pehd 5502/caco3), Thèse de master université d'Annaba , 2017
- [37] J. Verdu, Différents types de vieillissement chimique des plastiques. *Techniques de l'ingénieur*, AM 3 152, Ed. Afnor technique, 2002
- [38] M. Carrega et Coll, « Matériaux Polymères », 2 eme édition, Dunod, Paris, 2007.
- [39] R. Dossogne, polyéthylène a haute densité PE-HD, *Techniques de l'ingénieur*, traité Matériaux non métalliques.
- [40] Palettes en plastique WERIT L'entreprise I La palette en plastique I Avantages ,3030 · V11 ·0913 · 2, www.werit.eu. Consulté 24/10/2016
- [41] Christian PENU, Polyéthylène haute densité PE-HD ; *Techniques de l'ingénieur AM*, Vol. AM2, 2011

[42] Oussama ZAKI, Contribution à l'étude et à la modélisation de l'influence des phénomènes de transferts de masse sur le comportement mécanique de flacons en polypropylène ; Thèse de Doctorat, Université de Paris-Est-France, juillet 2008.

[43] Khaoula BEN HAFSIA ; Identification des micro-mécanismes de déformation du PET Amorphe et Semi-cristallin, thèse de doctorat-Université de Lorraine France. juin 2016

[44] Sadoun Sofiane Contribution a l'étude expérimentale d'un polyéthylène a haute densité (PEHD) : - Effet de la température et de la vitesse de déformation; thèse de magistère, Université d'Annaba – 2007

[45] Catalogue Technique , Groupe CHIALI : Tubes en polyéthylène PE société de sidi bel-abbes –Alger- www.groupe-chiali.com; consulté juin 2014



Chapitre II
Recherche Bibliographique
Sur les assemblages

II.1 Assemblages permanents

II.1.1 Introduction

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux s'est fait par forgeage. La rupture est intervenue à la fin du XIX^e siècle, lorsqu'il est devenu possible d'obtenir des températures de flammes suffisantes en mélangeant des gaz comme l'oxygène et l'acétylène désormais stockables en toute sécurité et que sont apparus des procédés de soudage, comme le soudage par résistance et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie. Avec ces procédés, la montée en température provoquée par une source thermique intense était bien plus rapide que la dissipation à l'intérieur de la pièce à souder. Le bain de métal en fusion obtenu se solidifiait en refroidissant pour constituer le joint unissant les deux pièces à souder. Le soudage à l'arc, le soudage par résistance et le soudage sous protection gazeuse ont tous été inventés avant la première guerre mondiale [1].

II.1.2 Les Assemblages Permanents

Un assemblage est constitué par un ensemble de deux pièces, l'un est le contenant ou pièce femelle et l'autre est le contenu ou pièce mâle, devront satisfaire à des conditions de fonctionnement. On peut assembler plusieurs éléments entre eux [2]. Un assemblage permanent comprend : les assemblages mécaniques et les assemblages thermiques (figure II.2)

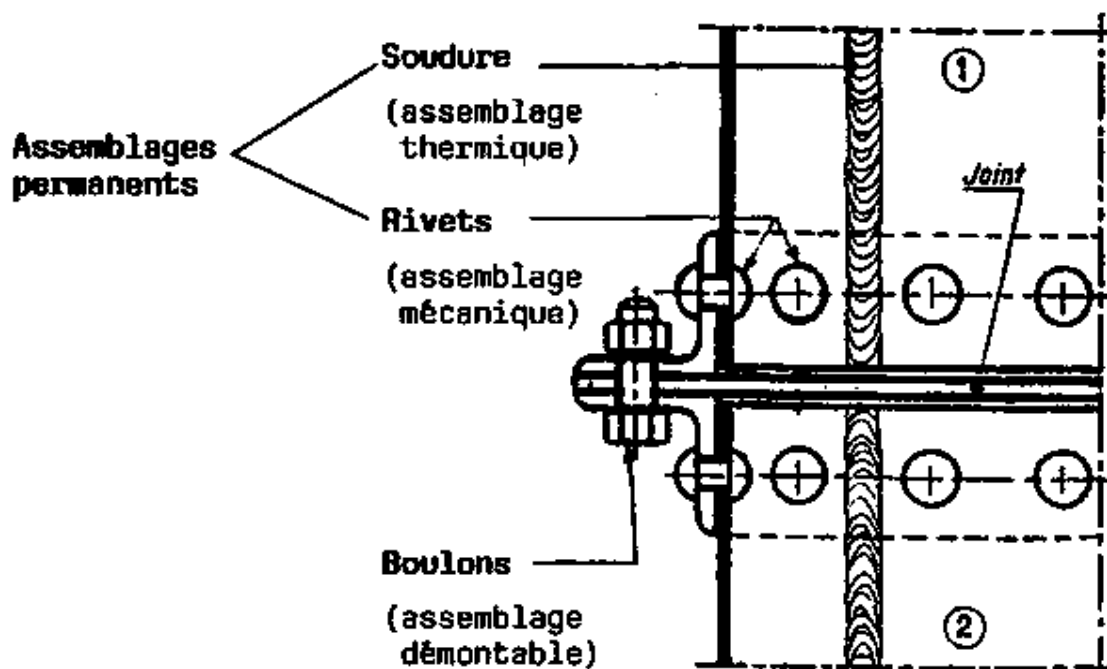


Figure II.1 : type d'assemblage des pièces [2].

Les pièces 1 et 2 sont assemblées entre elles au moyen de boulons serrés sur les cornières d'assemblage rivées sur chaque pièce. Les assemblages permanents, sont dits permanents lorsque les parties assemblées sont de façon inamovible; ce sont les plus courants [2].

II.1.2.1 Les Assemblages Permanents Mécaniques

Il existe de nombreux procédés d'assemblage mécanique tel que le rivetage, frettage, clinchage, sertissage, collage, etc...

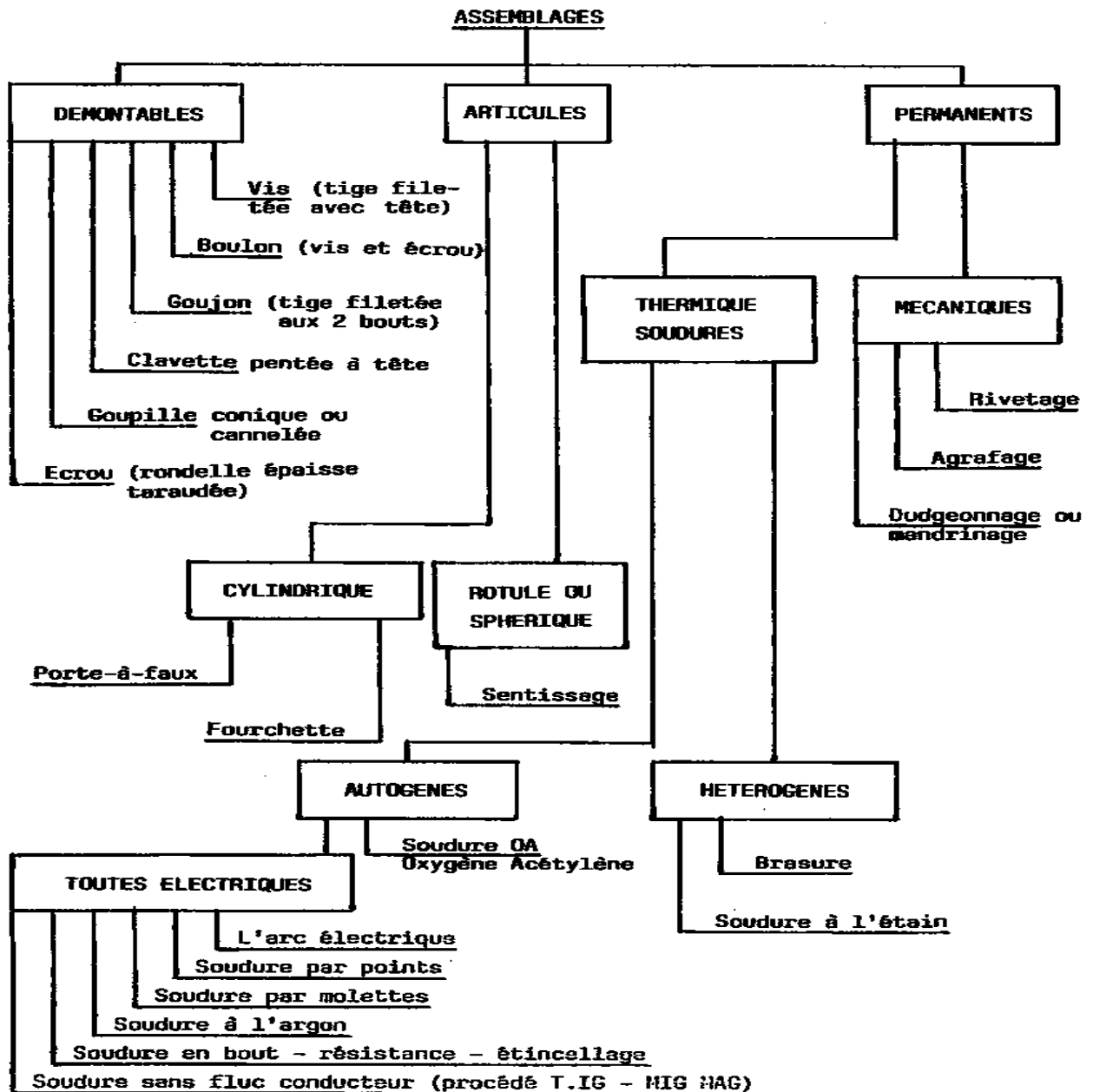


Figure II.2 : types d'assemblage [2].

(a) Rivetage :

Un rivet est un élément d'assemblage permanent. Il se présente sous la forme d'une tige cylindrique, généralement métallique, pleine ou creuse qui est munie à l'une de ses extrémités d'une « tête », c'est-à-dire une partie de section plus grande [3]. L'autre extrémité sera aplatie et élargie par écrasement, pour solidariser les éléments qu'on veut riveter ensemble. Ces éléments (par exemple deux plaques de métal) ont été percées au préalable chacune d'un trou permettant à la tige du rivet de traverser l'une et l'autre [3].

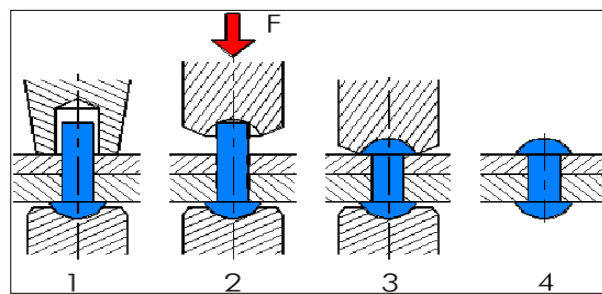


Figure II.3 : principe de fixation d'un rivet [3].

Très sérieusement concurrencé par le soudage, (cette technique n'est par exemple pratiquement plus appliquée en chaudronnerie), le rivetage conserve un domaine d'application relativement important dans l'industrie aéronautique. Ce procédé ne nécessite pas des investissements importants.

(b) Frettage:

Le frettage est l'assemblage de deux pièces grâce à un ajustement serré. La pièce extérieure est appelée « frette », la pièce intérieure est dite « frettée ». L'assemblage est réalisé avec des tolérances d'usinage qui interdisent son montage à la main ou même à la presse [6].

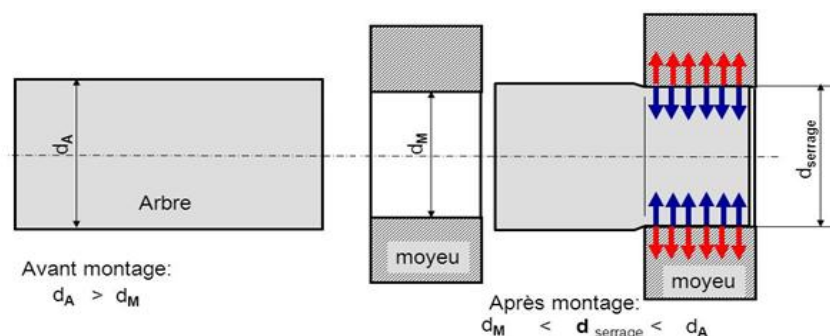


Figure II.4 : processus de frettage [6].

(c) Le clinchage:

L'assemblage haute résistance de matériaux métalliques permet d'assembler des tôles et des profilés par déformation locale à froid des matériaux. Il concerne l'assemblage de deux ou plusieurs épaisseurs selon les applications. Le point de clinchage est produit par l'interaction d'une matrice et d'un poinçon. Le clinchage ne détériore pas l'état de surface, les pièces à assembler peuvent être métalliques, laquées, peintes ou revêtues de matières plastiques [5].

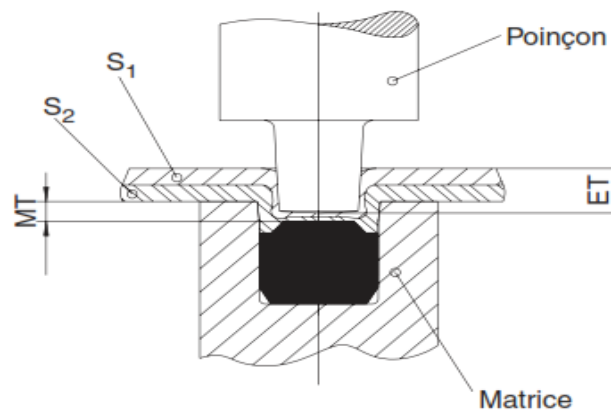


Figure II.5 : principe de Clinchage [5].

(d) Le sertissage

Le sertissage est un procédé d'assemblage qui consiste à rabattre le bord d'une pièce appelée la peau contre celui d'une autre, appelée la doublure. Cette méthode d'assemblage est largement utilisée dans l'industrie automobile pour les tôles constituant les ouvrants du véhicule (portières, capots, corèes, toits ouvrants, etc.).

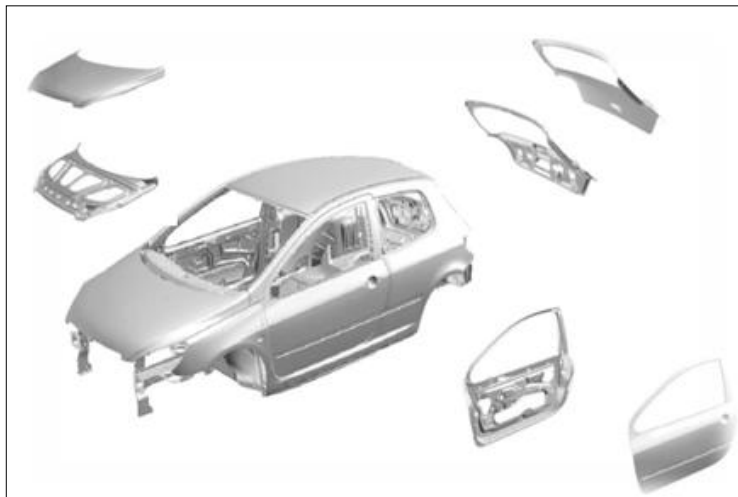


Figure II.6 : Exemples d'ouvrants sur un véhicule
Assemblés par sertissage [8].

(e) Le collage

Une colle est un produit chimique destiné à l'assemblage de deux matériaux. Liquide ou solide, on l'applique à l'état fluide sur le ou les matériaux à assembler sur lesquels elle doit donc d'abord accrocher par divers phénomènes physico-chimiques que nous allons examiner : c'est le phénomène d'adhérence. L'adhérence est une liaison inter-faciale et les forces de liaison peuvent être soit physiques, soit chimiques [10]. L'énergie de surface d'un solide représente la quantité de travail qu'il a fallu dépenser pour créer la dite surface, la température et la pression étant constantes. Elle s'exprime en J/m^2 [11].

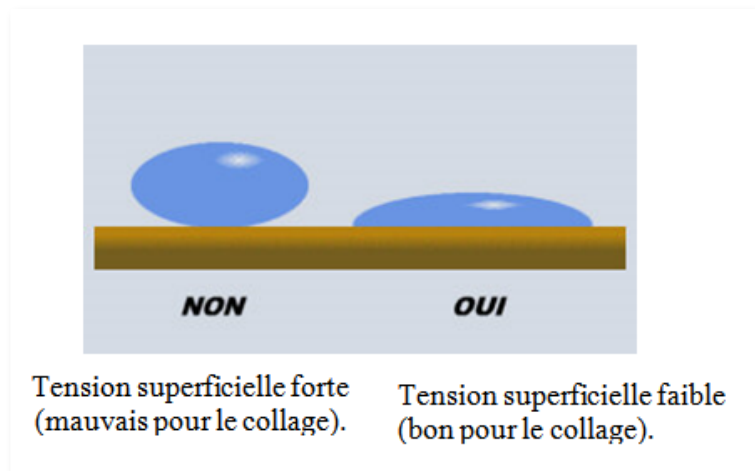


Figure II.7: tension d'une goutte de colle [11].

Les colles sont classées selon le type chimique on note :

- Les Produits naturels: comme colles animales; bitumes; dextrans; gommes naturelles; amidon.
- Thermodurcissables: comme acryliques anaérobies; époxydes; polyesters insaturés; Polyuréthanes; mélamine-formol; phénol-formol; urée-formol.
- Thermoplastiques: comme acrylates; acryliques; cyanoacrylates; thermo-fusible; polyamides; polyester saturé; poly-acétate de vinyle; polyalcool vinylique; polychlorure de vinyle.
- Élastomères et caoutchoucs synthétiques : comme le caoutchouc chloré; latex naturel; butadiène-acrylonitrile; caoutchouc butyle; poly-chloroprène (Néoprène); silicones ; butadiène-styrène.
- Adhésifs inorganiques: on a les ciments; céramiques; silicates [9].

1- Principaux adhésifs utilisés dans l'industrie

Permis les types des adhésifs les plus utilisées on à les adhésifs structuraux on note :

a) Adhésifs anaérobies

Ce sont des résines acryliques qui durcissent en présence de métal ou en absence

d'oxygène atmosphérique. Ce type de matériau polymérique à haute densité de réticulation constitue une couche d'adhésif thermodurcissable très résistante et dure.

b) Cyanoacrylates

Ce sont des résines acryliques qui, par opposition aux anaérobies, durcissent sous l'effet catalytique de l'humidité présente sur la plupart des surfaces. Dans certaines conditions atmosphériques très chaudes ou très froides, cette couche est pratiquement inexistante et le durcissement est alors difficilement obtenu.

c) Résines acryliques à haute ténacité

Sont des résines acryliques modifiées qui possèdent des temps de prise très courts et qui présentent des résistances et une ténacité élevées. Elles sont livrées sous forme de deux composants (une résine et un catalyseur) qui sont généralement appliqués séparément : la résine sur l'une des surfaces, le catalyseur sur l'autre. Elles nécessitent une préparation de surface minimale et montrent de bonnes propriétés d'adhérence sur une large gamme de matériaux [9].

d) Résines époxydes

Ce sont les adhésifs structuraux le plus couramment utilisés. Ils se composent d'une résine époxyde et d'un durcisseur et offrent une grande variété de formulations puisqu'il existe de nombreuses résines et de nombreux durcisseurs. Ils forment des liaisons extrêmement résistantes et durables avec la plupart des matériaux. Des adhésifs mono-composants époxydes sont également disponibles. Ils ne nécessitent pas d'opération de mélange et durcissent à la chaleur dans des conditions contrôlées. Lorsqu'il est complètement durci, le joint possède des résistances élevées en cisaillement, en traction ainsi qu'en compression.

e) Polyuréthanes

Les adhésifs polyuréthanes les plus courants sont des bi-composants à durcissement rapide. Ils conduisent à des liaisons résistantes, en particulier, au choc. Ils sont utilisés pour le collage de plastiques renforcés par des fibres de verre. Leur durcissement rapide nécessite souvent une application à l'aide d'une machine [9].

f) Résines phénoliques

Sont des résines de phénol-formol ou de crésol-formol. Cette classe d'adhésifs est l'une des premières à avoir été utilisée pour des applications structurales. Les résines phénoliques sont disponibles sous diverses formes mais présentent l'inconvénient de dégager des composés volatils au cours du durcissement. Certains types de résines peuvent résister à des températures extrêmement élevées pendant de brèves périodes. Elles nécessitent souvent un équipement d'application spécialisé [9].

II.1.2.2 Les Assemblages Permanents Thermiques

1. Introduction

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, le soudage se présente sous deux aspects [13].

a) Le soudage autogène

Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal d'apport, est une opération de "fusion localisée" de deux pièces de même nature. Le métal de base se dilue dans le métal d'apport. La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler.

b) Le soudage hétérogène

Lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente. Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et ne participent pas à la constitution du joint. Ce rôle est uniquement rempli par le métal d'apport, dont la température de fusion est plus basse et qui assure, en se solidifiant, une liaison métallique entre les surfaces à assembler [13]. Dans ce procédé on distingue :

Le brasage fort dont la température de fusion du métal est supérieur à 450°C, avec utilisation du décapant Borax, le brasage tendre dont la température de fusion du métal est inférieure à 450°C avec utilisation du décapant Borax, le soudo-brasage réalisé généralement au chalumeau. La température à obtenir varie suivant les métaux à souder : aciers et fontes de 600°C à 900°C ; le Cuivre de 850 à 900°C ; et l'aluminium 600°C.

II.1.2.3 Classification des procédés de soudage

Les procédés de soudage caractérisés par le type de source d'énergie pour réchauffement et par l'état du métal à l'endroit du soudage. Selon le type de la source d'énergie on distingue :

- Énergie thermo-chimique ; énergie thermo-électrique ; énergie mécanique ; énergie de

rotation [13]. Les sources d'énergie doivent être capables d'apporter en un temps assez court une grande quantité de chaleur en un point bien localisé.

De gros progrès technologiques sont venus apporter une solution à ce problème au début du siècle, tout d'abord par l'emploi de la flamme oxyacétylénique puis de l'arc électrique et selon l'état du métal pendant le soudage on distingue : Le soudage par fusion qui comprend le soudage au gaz et soudage à l'arc électrique et le soudage par faisceaux à haute densité d'énergie et le soudage par pression.

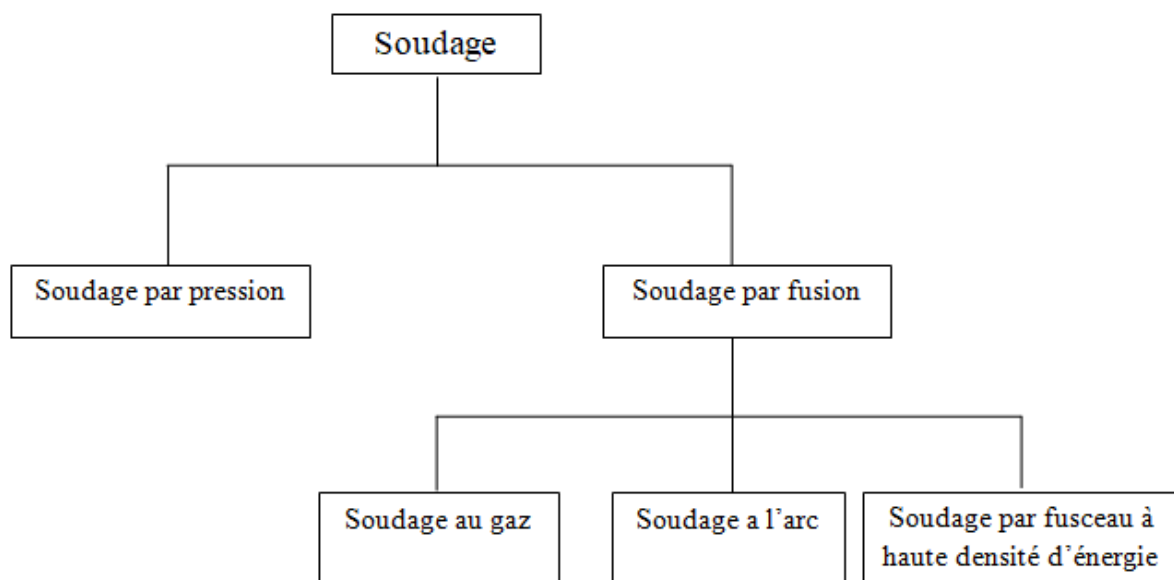


Figure II.8 : Organigramme des procédés de soudage [1].

1) Le soudage par fusion

Qui consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder à l'aide d'une source d'énergie tels que l'arc électrique, flamme de gaz, réaction chimique, énergie de rayons laser, jet de plasma etc.... Sous l'action de la chaleur les bords du métal sont fondus et établissent une liaison entre eux ou encore avec un métal d'apport, ainsi formant le bain de fusion, le quel après solidification constitue la soudure [13].

1.a) Soudage au gaz oxyacétylénique (soudage par chalumeau)

La source d'énergie est la flamme oxyacétylénique. Il est le seul procédé utilisé pour l'exécution des joints soudo-brasés ou brasés. Ce procédé présente une grande souplesse et recommandé pour l'exécution de travaux délicats sur des pièces de nuances diverses et de petites dimensions [13]. Le soudage Oxyacétylénique est un procédé de soudure à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible

l'acétylène -C₂H₂ avec un gaz comburant d'oxygène-O₂. La température de la flamme peut atteindre les 3200 ° C, lorsque le mélange C₂H₂ et O₂ est correctement équilibré dans le chalumeau. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de Ø 0,8 mm à Ø 4,0 mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. On peut souder « en bord à bord » [14].

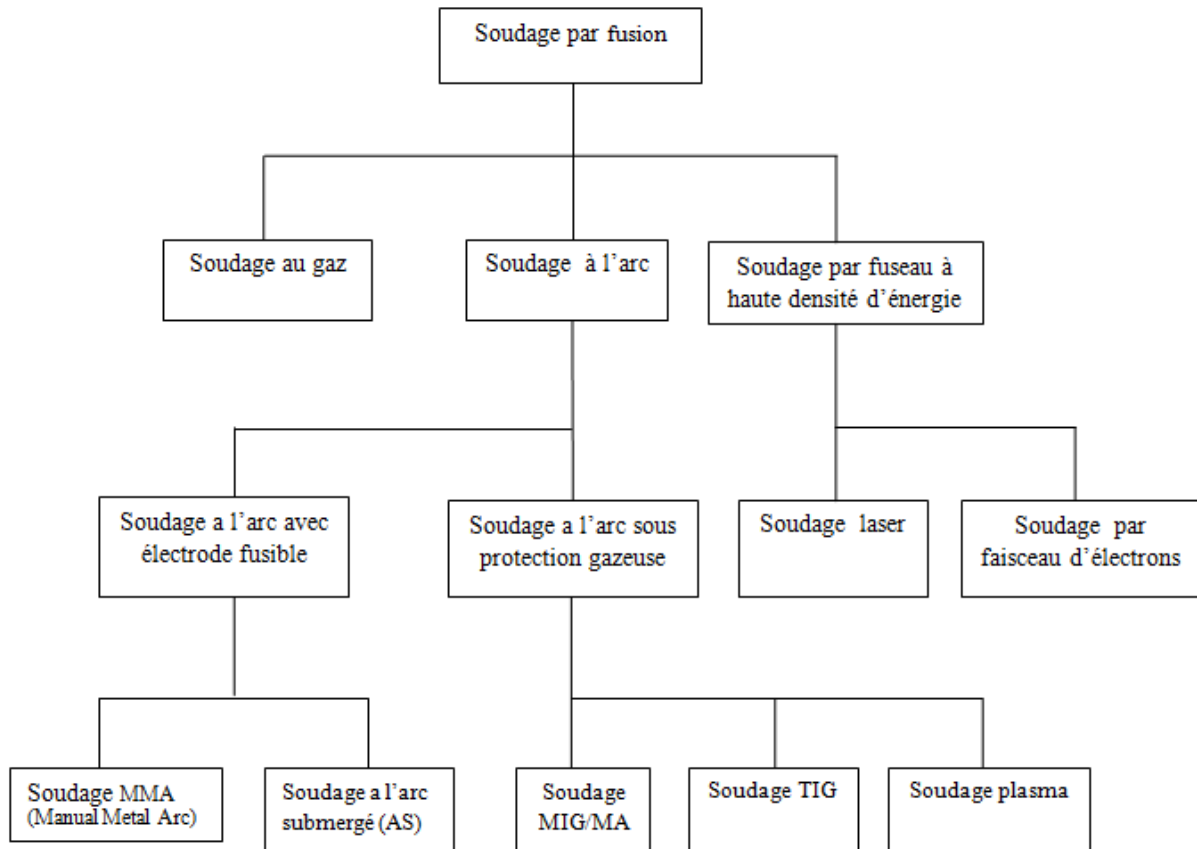


Figure II.9 : Organigramme des procédés de soudage par fusion [1].

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.

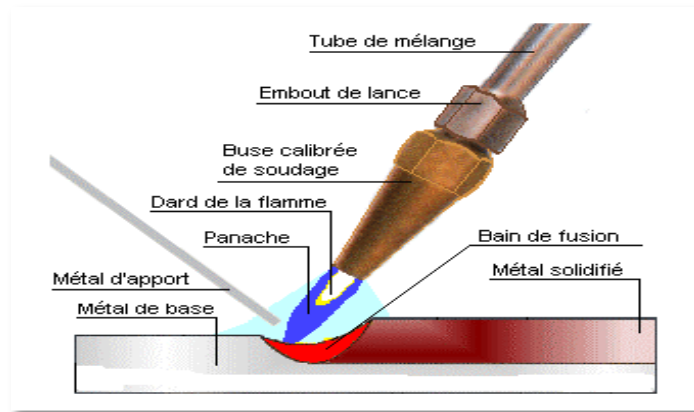


Figure II.10 : Principes de soudage par chalumeau [14].

1.b) Soudage à l'arc électrique

Les techniques de soudage à l'arc, sont plus utilisés et courantes dans l'industrie notamment pour l'assemblage des pièces en acier, qui utilise une alimentation en courant électrique alternatif ou continu. Ce courant est utilisé pour créer un arc électrique qui génère suffisamment de chaleur pour faire fondre le métal et réaliser la soudure. La quantité de chaleur dégagée par l'arc électrique permet une fusion instantanée des bords des pièces à souder et du méta d'apport. Le rendement énergétique de l'arc varie en fonction du procédé de soudage, de la nature du courant de celle du matériau et de l'épaisseur des pièces à souder. [15]

1.b.1) Soudage avec électrode fusible (enrobée).

Dans ce procédé, une électrode métallique est enrobée de fondant et reliée à une source de courant électrique. Le métal à souder est relié à l'autre borne de cette même source de courant. En pointant l'électrode sur le métal, un cordon se forme.

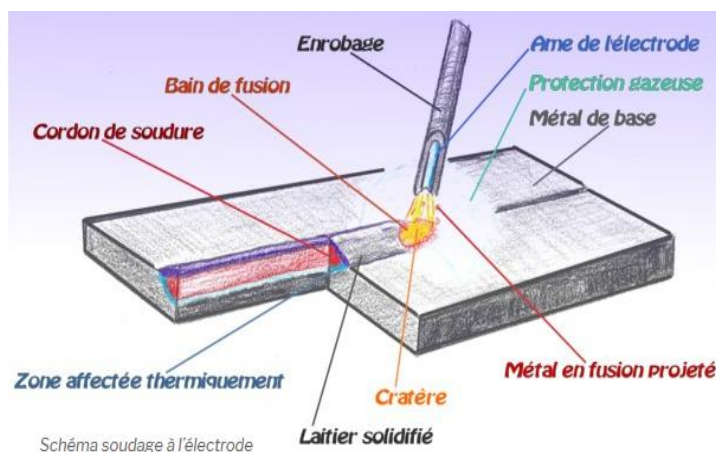


Figure II.11: le soudage a arc avec électrode enrobée. [15]

La chaleur intense de l'arc fait fondre les deux parties à souder, ainsi que l'électrode métallique qui fournit le métal d'apport pour la soudure. Ce procédé de soudage est très utilisé pour le soudage des aciers de construction, aciers non alliés ou faiblement alliés et pour une moindre mesure pour les aciers réfractaires, et alliages spéciaux.

On l'utilise parfois aussi pour le soudage des fontes, des alliages cuivreux et pour des travaux de rechargement. Il permet également de souder tous les types de joints en toute position même sur les chantiers et pour toutes épaisseurs ($e > 1\text{mm}$) avec un faible coût en équipement [15].

1.b.2) Soudage MIG/ MAG (Métal Inerte Gas et Métal Active Gas)

C'est un soudage à l'électrode fusible sous protection gazeuse. L'opération de soudage est obtenue par la création grâce à un générateur de courant d'une différence de potentiel entre l'électrode et le métal de base. Un arc électrique est ainsi créé et il fournit toute l'énergie nécessaire pour faire fondre d'une part l'électrode qui constitue le métal d'apport et d'autre part localement le métal de base.

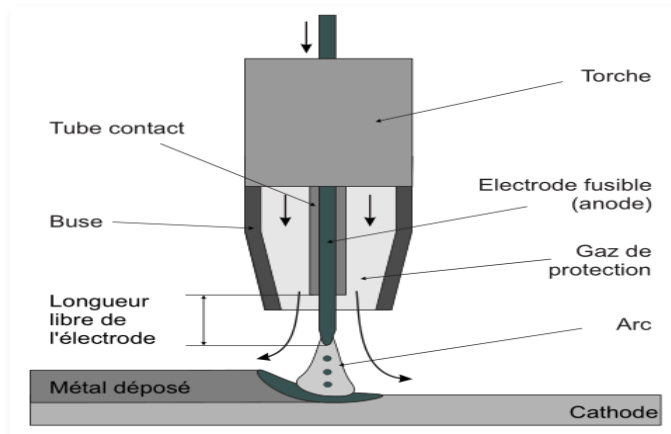


Figure II.12 : Schéma de la torche à plasma MIG/MAG [17].

La puissance électrique est apportée au fil du soudage au niveau d'une pièce métallique cylindrique appelée tube-contact. La longueur de fil sortant du tube contact porte le nom de partie terminale et la hauteur de l'arc électrique porte le nom de longueur d'arc [16].

Le bain de métal liquide, créé par la fusion des métaux de base et du métal d'apport, est une zone où le mélange des métaux est réalisé. Lors de la phase de soudage, l'ensemble des éléments constituant le joint de soudage est sous forme liquide [16].

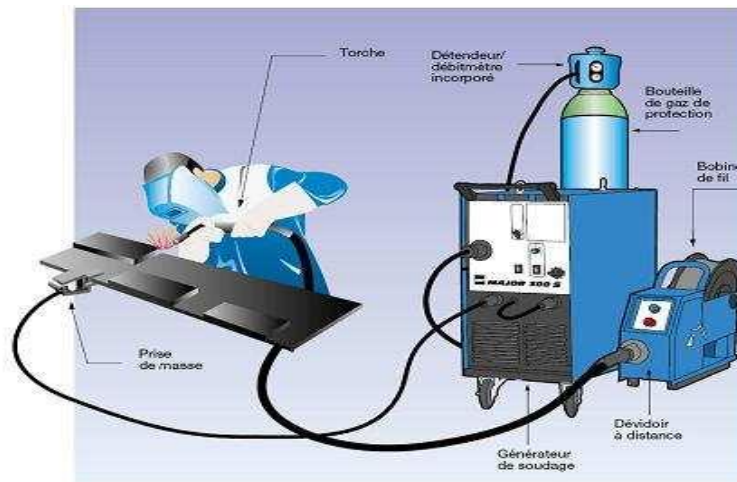


Figure II.13 : Schéma d'une Opération de soudage MIG/MAG [16].

1.b.3) le soudage TIG (Tungsten Inert Gas)

Lorsque le soudeur actionne la gâchette, celui-ci actionne d'une part la sortie du gaz, et en même temps, il ferme le circuit électrique qui permet le passage du courant. Si le fil est suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il se crée un arc électrique d'une énergie suffisante pour fondre la matière. Le soudeur apporte manuellement (ou automatiquement sur certaines installations) le métal d'apport (d'un diamètre d'environ 0,8 mm à 4 mm) pour le mélanger à la matière et ainsi grossir la partie fondue en créant le cordon de soudure. Le tout s'exécute sous protection gazeuse. La soudure TIG a la particularité d'être exécutée sous protection de gaz inerte (ex. gaz argon et/ou hélium) avec une électrode non fusible et réfractaire (en tungstène) [15].

1.b.4) Le soudage Plasma

Le soudage plasma se caractérise par la transformation à l'état de plasma d'un gaz plasma-gène par un arc électrique établi entre une électrode réfractaire et la pièce à souder. Ce gaz est confiné mécaniquement et cinétiquement par l'intermédiaire d'une tuyère refroidie, à travers laquelle on l'oblige à passer. La protection du métal en fusion est assurée par un gaz annulaire, la forte constriction de l'arc obtenue permet de disposer d'une forte densité d'énergie ($107\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$). Ce procédé permet de traverser les pièces de part en part et il permet d'accroître les performances du soudage à l'arc conventionnel et d'augmenter la vitesse de soudage et l'épaisseur des éléments à assembler [15].

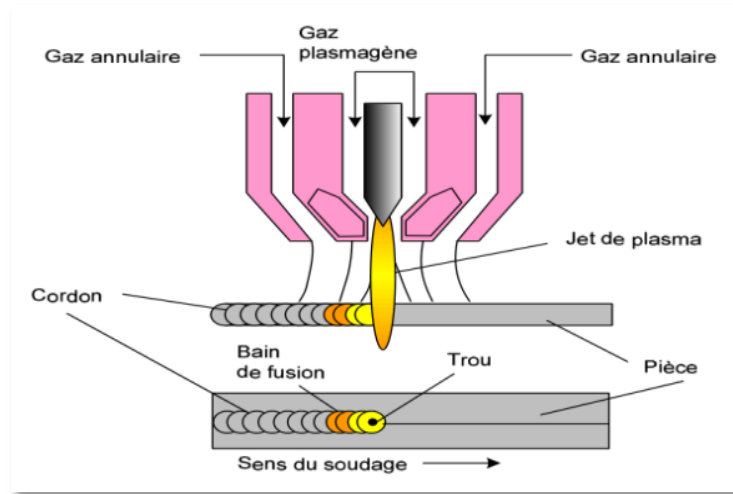


Figure II.14 : Principe du soudage plasma [15].

1.c) Soudage par faisceaux à haute densité d'énergie

Il s'agit d'une technique d'assemblage extrêmement fine et particulièrement bien adaptée au soudage de petits éléments avec peu de déformations. Il comprend deux sources d'énergie on note : le Soudage LASER et le Soudage par faisceau d'électrons [15].

1.c.1) Soudage LASER

Le mot LASER signifié en anglais : " Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", c'est-à-dire : amplification de lumière par émission stimulée de radiation. Tout laser comprend les éléments suivants : un milieu émetteur, une excitation (appelée pompage) et une amplification (résonateur optique). Le laser est donc une source lumineuse possédant des propriétés particulières qui le distingue des sources habituelles, les lasers émettent un faisceau qui diverge très peu. Ce type d'appareil peut produire un faisceau lumineux en un point de diamètre réduit à la surface (ou sous la surface) des pièces à souder. Lorsque la densité de puissance atteinte est de l'ordre de 10^3 à 10^4 W.cm^{-2} , il se produit une vaporisation du métal qui donne naissance à une cavité termite et profonde, appelée " capillaire ". Cette source d'énergie est utilisée pour le soudage à haute vitesse et forte pénétration, dans les cas où les procédés plus classiques ne peuvent pas assurer la productivité requise et le respect des contraintes de distorsion [15].

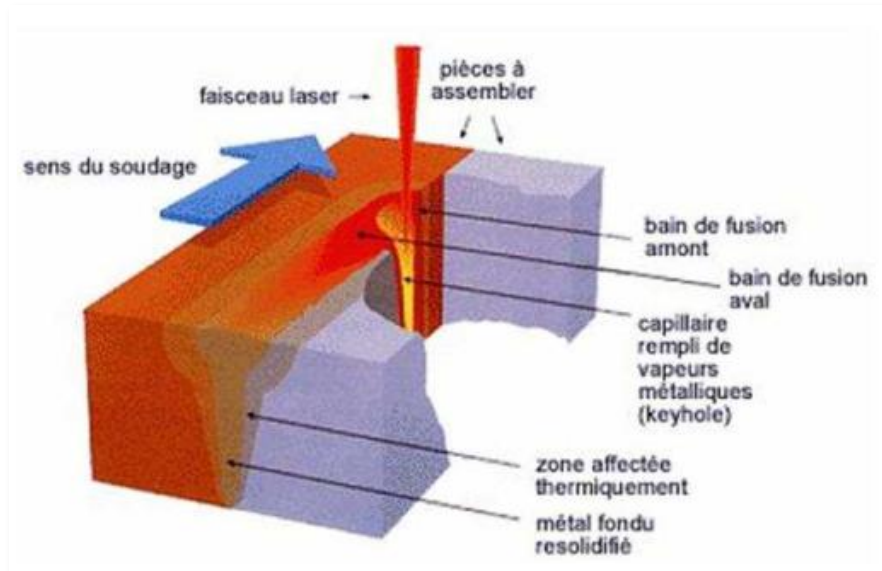


Figure II.15 : Principe du soudage laser [15].

1.c.2) Soudage par faisceau d'électrons.

Le soudage par faisceau d'électron est un procédé à haute densité d'énergie créant une zone fondue de faibles dimensions qui permet d'assembler les matériaux les plus divers avec de très faibles déformations [20].

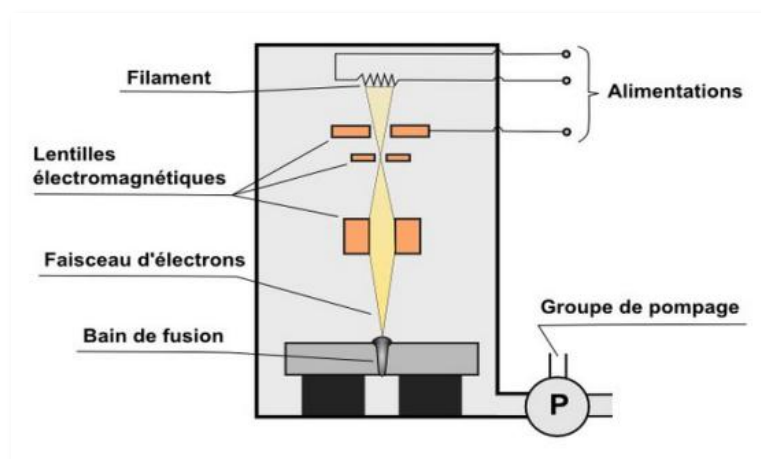


Figure II.16: principe de soudage par faisceau d'électrons [21].

1.c.3) Le soudage ultrason

Le soudage ultrasons est l'un des procédés les plus utilisés dans l'industrie pour l'assemblage de pièces thermo fusibles. Ses principales caractéristiques sont la propreté de

la soudure et sa rapidité d'exécution. Le principe du soudage consiste à associer une pression d'appui à la vibration ultra sonore. L'énergie ultrasons, compte tenu des caractéristiques des matériaux, produit un échauffement intense dans la matière. Elle fusionne à l'interface de l'assemblage. Le soudage par ultrasons ne nécessite pas d'agent de soudage [25].

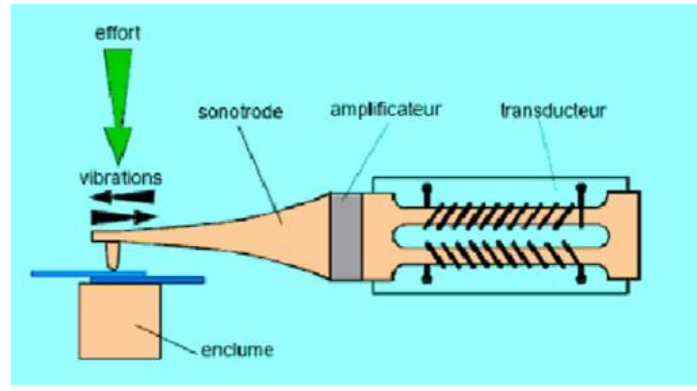


Figure II.17: principe de soudage Ultrasons [25]

2) Le soudage par pression

Le soudage par pression regroupe tous les procédés de soudages dans lesquels on obtient en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage [13].

2.a) Le soudage par points

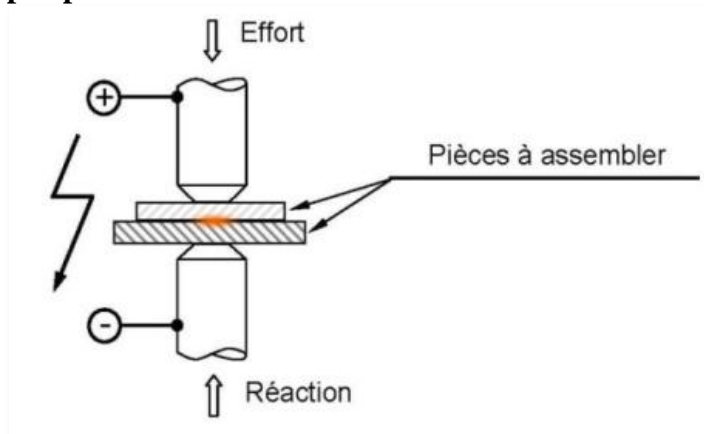


Figure II.18 : soudage par point [23]

2.b) Le soudage par bossage

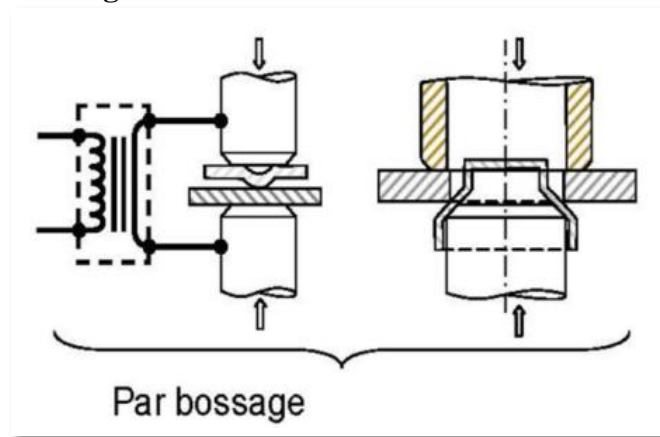


Figure II.19: soudage Par bossage [23]

2.c) Le soudage à la molette

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des disques en cuivre, ou molettes, qui par rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches. La soudure se réalise de façon progressive et continue, associant serrage des tôles et passage du courant, sur toute la longueur du cordon à réaliser.

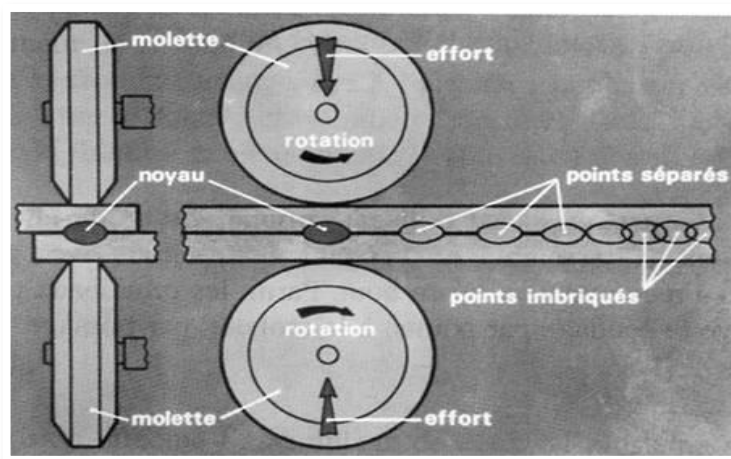


Figure II.20: principe de soudage par molette [23]

2.d) Le soudage en bout par étincelage

Le procédé de soudage en bout, première forme du soudage par résistance, permet, comme son nom l'indique, de souder bout à bout des barres ou des profilés de même section droite ou des pièces ayant reçu une préparation les ramenant à ce cas et représentée une opération de

soudage en bout. Les pièces sont placées dans des mâchoires en cuivre, dont l'une est fixée sur un chariot mobile en translation parallèlement à l'axe de soudage.

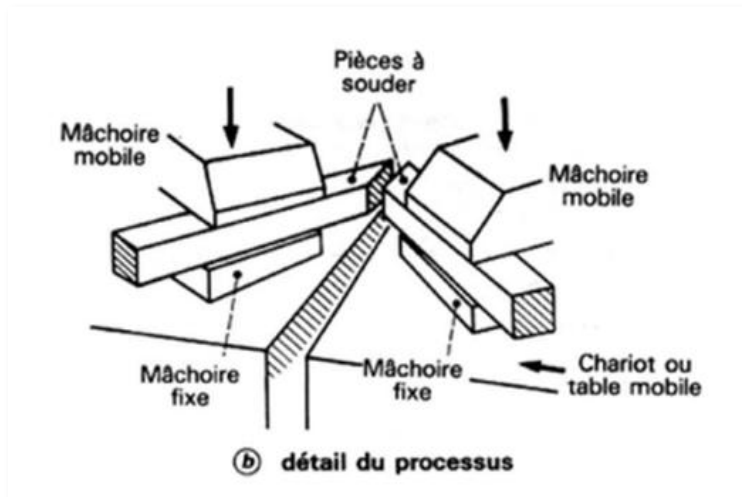


Figure II.21 : principe de soudage en bout [24].

3.) Le soudage par friction

Le soudage par friction est un procédé de soudage mécanique où la chaleur nécessaire pour le soudage est fournie en frottant l'une contre l'autre les pièces à assembler sous une pression axiale mais le plus utilisé du soudage par friction est effectué par rotation.

On met en rotation ou on fait vibrer à grande vitesse une pièce, on la force à entrer en contact avec l'autre ce qui dégage de la chaleur par friction à l'interface et lorsque les deux pièces sont chaudes elles sont forgées ensemble et par conséquent lorsqu'elles refroidissent elles sont soudées [25] par exemple le soudage par friction orbital.



Figure II.22 principe de soudage par friction orbital [25]

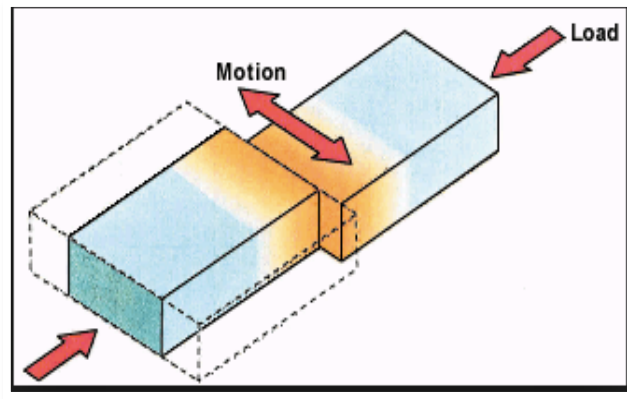


Figure II.23 : principe de soudage par friction linéaire [25].

II. 1.2.4 Les avantages et inconvénients des procédés d'assemblages permanents :

Chaque type de procédé d'assemblage comprend des avantages et des inconvénients [26,27].

1. pour l'Assemblages permanents mécaniques on cite les avantages et les inconvénients suivants :

-Pas d'influence thermique des matériaux à assembler ; peu ou pas tensions résiduelles, déformations ou fragilisation ; Possibilité d'assembler une large gamme de matériaux métalliques et non métalliques et Possibilité d'assembler des matériaux d'épaisseurs différentes, contrôle de qualité simple (visuel) ; Rendement économique élevé (faible coût d'investissement) ; Possibilité d'assembler des matériaux revêtus, Techniques écologiques, pas de gaz ou de fumées) ; Reproductibilité élevée. Pour les inconvénients : la plupart des techniques d'assemblage mécanique ne sont pas appropriées pour la réalisation d'assemblages aplatis ; Charge admissible plus faible en comparaison avec le soudage ; Distorsion géométrique des pièces (propre au procédé utilisé), Réparation souvent complexe d'assemblages mal exécutés ; Peu de normes et méthodes de calcul disponibles ;

2. pour l'Assemblages permanents thermiques (autogènes et hétérogène) : pour ce type d'assemblage on note Une haute facilitée de fabrication de la soudure, conditionnant le bas coût de la liaison soudée ; La réduction de la masse des pièces soudées en comparaison avec le collage ou la rivure à 25 ... 30 %; La possibilité d'obtenir un joint, avec la même résistance que la résistance du métal principal (à l'étude et à la fabrication juste) ; Les assemblages soudés présentent une résistance élevée par rapport à d'autres types d'assemblages;

La possibilité de recevoir des pièces de forme complexe de simples ébauches ; Le soudage est très souvent employé en combinaison avec le moulage, forgeage, estampage, etc., ce qui permet d'obtenir des pièces d'une forme très compliquées et dont les dimensions sont très grandes. La possibilité de recevoir des liaisons hermétiques ; Une haute maintenabilité des produits soudés. Haute productivité, bas prix de revient avec possibilité d'obtention des assemblages étanches. Diminution des dépenses initiales des équipements des ateliers de soudage. Pour les inconvénients de ce type soudage on cite Le gondolage (déformation spontanée) des produits durant la soudure et au vieillissement ; La possibilité de la création durant la soudure des forts concentrateurs de contraintes ; La complexité du contrôle qualité des liaisons soudées sans leur destruction ; La complexité de l'approvisionnement de la haute fiabilité à l'action des charges de choc, cyclique, y compris vibratoire.

II.12.5 Conclusion

On estime qu'il y a une quarantaine ou une cinquantaine de procédés de soudage au total, on cite ces procédés au dessus à titre d'exemple pour faire des comparaisons et pour l'étude, ces procédés d'assemblage avec ou sans chauffage offrent d'importants avantages en matière écologique, économique et santé, et aussi qui ont de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie.

II. 2 Soudage par friction-malaxage

II.2.1 Introduction

Cette partie est consacré à une étude bibliographique sur le procédé de soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Welding), on donne une description sur ce procédé où on va présenter les différents travaux qui ont traité ce type de soudage sur des différents matériaux en particulier les travaux dédiés sur le PEHD.

II.2.2 Procédé de soudage par friction malaxage

Le procédé de soudage par friction-malaxage FSW (Friction Stir Welding) est un procédé de soudage continu par friction créé en 1991 sous la forme d'un brevet déposé par l'institut de soudure britannique « The Welding Institute (TWI) ». Le FSW convient particulièrement bien aux alliages à bas point de fusion (aluminium, magnésium, cuivre) et trouve avec ces matériaux ses applications industrielles principales: aéronautique, spatial, transports terrestres, construction navale. Le principe consiste à fournir de la chaleur au métal de base par friction du métal par un pion fixé sur une embase qui tourne dans le plan de joint des pièces à assembler. Une couche de métal sous forme plastique et pâteuse est

formée sous l'embase et autour du pion. Ce procédé qui réalise l'assemblage à une température inférieure à la température de fusion du métal à assembler déforme moins que les procédés par fusion. De plus, les caractéristiques mécaniques des matériaux soudés restent proches des valeurs initiales des matériaux de base [29].

II.2.3 Description du procédé

Le procédé de soudage par friction malaxage, représenté sur la Figure II.24, met en œuvre un mandrin tournant qui reçoit l'outil de soudage proprement dit, le quel se présente sous la forme d'un cylindre de révolution en acier à haute résistance comportant un épaulement prolongé par une tige ou une pointe coaxiale, elle même cylindrique ou tronc conique, et comportant en surface diverses sortes de reliefs.

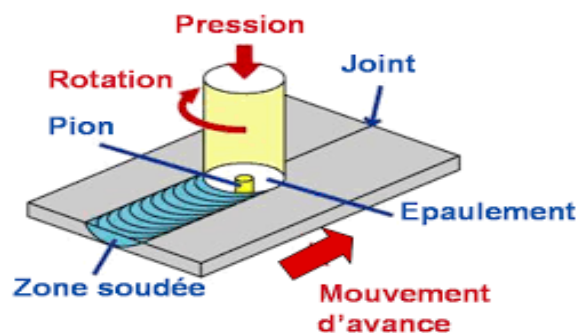


Figure II. 24: Schéma du procédé de soudage par friction-Malaxage [30].

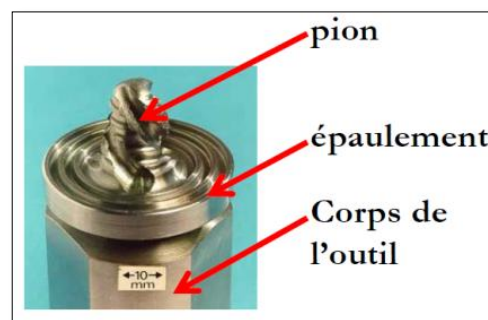


Figure II. 25 : Exemple d'un Outil de soudage FSW [31].

La tête de soudage ainsi constituée, est fixée sur un support qui présente l'outil en rotation sur le joint des deux tôles à souder, fixées elles même sur un montage d'appui, et qui le met ensuite en contact avec elles. La chaleur engendrée par la friction rend la matière environnante visqueuse, et permet à la tige d'y pénétrer jusqu'à l'épaulement.

On commande ensuite le déplacement de l'outil le long du joint. Le métal visqueux, malaxé

par la rotation de l'outil sous l'effet de reliefs qu'il comporte, flue de part et d'autre de celui-ci de façon quelque peu dissymétrique de l'avant vers l'arrière enformant la liaison des deux bords puis la soudure proprement dite après refroidissement.

L'épaulement, outre le fait qu'il limite la pénétration, aussi pour rôle d'empêcher le métal de fluer vers le haut. La soudure prend place en phase solide et l'absence de fusion en fait le principal intérêt [29]. Pour faciliter le rôle de l'épaulement concave de confinement de la matière, l'outil peut être incliné d'un angle appelé angle de l'étalonnage allant jusqu'à (3°) , Le matériau subit donc une opération d'extrusion et une opération de forgeage combiné. Les efforts mis en jeu sont tels qu'un bridage important doit être mis-en place afin d'assurer le maintien de la configuration de soudage.

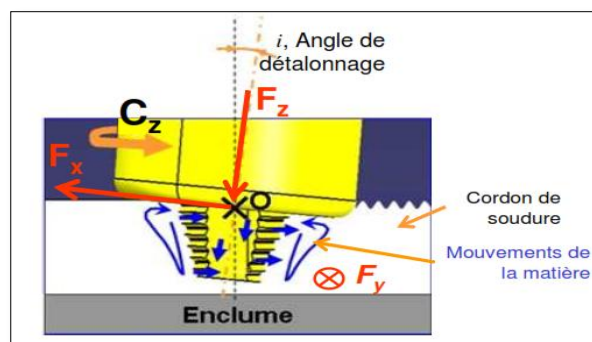


Figure II. 26: Schématisation des efforts et du couple générés lors du FSW [32].

Pour obtenir une liaison complète, le pion doit avoir une longueur quasiment égale, de préférence à l'épaisseur des tôles à souder et le soudage s'exécute en une passe, voire deux passes opposées pour les épaisseurs élevées.

La vitesse de rotation et de déplacement de l'outil dépendent du matériau et de l'épaisseur des plaques soudées. Généralement, la vitesse de rotation est comprise entre 100 et 1500 tr/min,

Les paramètres à choisir pour réaliser une soudure peuvent être répertoriés en se basant sur le réglage d'une configuration de soudage :

- ✓ Forme de l'épaulement : concave ou plat avec rainure(s) ;
- ✓ Forme du pion : très variable ;
- ✓ Vitesse de rotation de l'outil ω ;
- ✓ Vitesse d'avance de l'outil V ;
- ✓ Angle d'étalonnage α ;

- ✓ Effort de plongée F ou pénétration δ .

Pour le dernier paramètre, deux méthodes pour régler le mouvement vertical sont possibles [1,4].

La première consiste à imposer l'effort à appliquer sur l'outil alors que la deuxième consiste à imposer la position de l'outil dans la soudure lors du soudage (pénétration).

Il est également nécessaire de choisir les accélérations pour les mouvements d'avance et de rotation à régler sur chacun des axes.

II.2.5 Les Avantages et les inconvénients du procédé FSW

II.2.5.a Les avantages :

Le soudage par friction malaxage comporte beaucoup d'avantages, sont classés en trois groupes dans le domaine métallurgique, environnement et énergétique comme suit :

1. Avantages métallurgiques

- Procédé en phase solide.
- Faible distorsion de la pièce.
- Stabilité dimensionnelle et répétabilité.
- Éléments d'alliage conservés.
- Bonnes propriétés métallurgiques dans le joint soudé.
- Faible taille de grain.
- Faible fissuration [33].

2. Avantages environnementaux

- Élimination des gaz.
- Élimination du besoin de nettoyer les surfaces.
- Élimination des dissolvants.
- Élimination des matières ajoutées [33].

3. Avantages énergétiques

- Réduction de la quantité de matière utilisée.
- Consommation réduite d'énergie : 97,5% de réduction par rapport au soudage laser.
- Diminution de la consommation de carburant des véhicules à cause de sa réduction de poids [33].

II.2.5.b Les inconvénients :

Les inconvénients relatifs à cette technologie de soudage proviennent pour une grande part des efforts mécaniques à mettre en œuvre pour réaliser l'assemblage :

- Les configurations des géométries soudées sont limitées, en raison notamment de l'encombrement de la tête de soudage et du bridage ;
- Nécessité de positionner sur le côté envers des pièces un support très rigide (plaque, barre, enclume, ...) afin de supporter les efforts verticaux appliqués par la tête de soudage ;
- Coût élevé de l'investissement (machine, outillage et bridage) et coût relatif au brevet de la technologie (acquisition des licences et royalties) ;
- Actuellement, seuls les matériaux à bas point de fusion (Al,Cu,Mg) sont soudables industriellement, pour des raisons de durée de vie de l'outil ;
- Formation d'un trou à l'extrémité de certaines soudures ;
- Pas d'apport de métal pour maîtriser la composition de la zone de liaison [34].

II.2.6 Configuration des joints soudés par FSW

La Figure II. 4 montre les différentes configurations possibles pour le soudage FSW [34].

- 1) Soudage bout à bout ;
- 2) Soudage bout à bout, avec deux plaques l'une sur l'autre ;
- 3) Soudage par recouvrement ;
- 4) Soudage par recouvrement multicouche;
- 5) et (6) Soudure en T ;
- 7) et (8) Soudure en L.

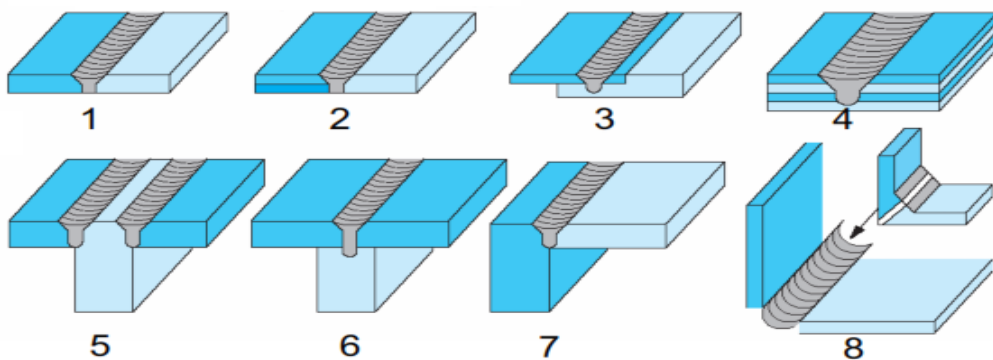


Figure II. 27: Schéma de différentes configurations possibles en FSW [34].

II.2.7 Machines dédiées au FSW

Les machines classiques permettant de souder par FSW ressemblent à des fraiseuses. Elles sont munies d'un outil porté en rotation et animé de mouvements relatifs par rapport à une pièce solidement fixée sur une table ou un support. Une machine classique de FSW, de type portique (Figure II. 28) [34]. Les soudures par friction malaxage peuvent également être effectuées sur de simples fraiseuses sur lesquelles un outil FSW est adapté. L'avantage principal de cette technologie est d'obtenir des soudures à moindre coup. L'investissement d'une machine dédiée à la friction malaxage étant onéreux. FREDERIC [35] a montré que tous les appareils dotés d'un mandrin rotatif pourraient servir à faire du soudage par friction malaxage. Il requiert toutefois que celui-ci puisse fournir une force axiale assez importante pour réussir les soudures. Même si ce paramètre est rarement contrôlé, l'appareil doit être en mesure d'insérer l'outil dans le métal et de maintenir sa position. Ainsi, les machines d'usinage à commande numérique et les robots industriels sont aussi efficaces que les véritables machines conçues strictement pour ce procédé tel que le « ESAB Super Stir machine » utilisé par « The Welding Institute » (TWI), Figure II.28. Cependant, peu importe le type d'appareil utilisé, il est primordial que les pièces à souder soient fixées solidement afin d'éviter les déplacements et de minimiser les déformations de celles-ci causés par les forces importantes du mandrin et des réactions aux appuis. Certaines machines utilisent un système de maintien par vacuum alors que la plupart des autres utilisent un système mécanique ou hydraulique [35].

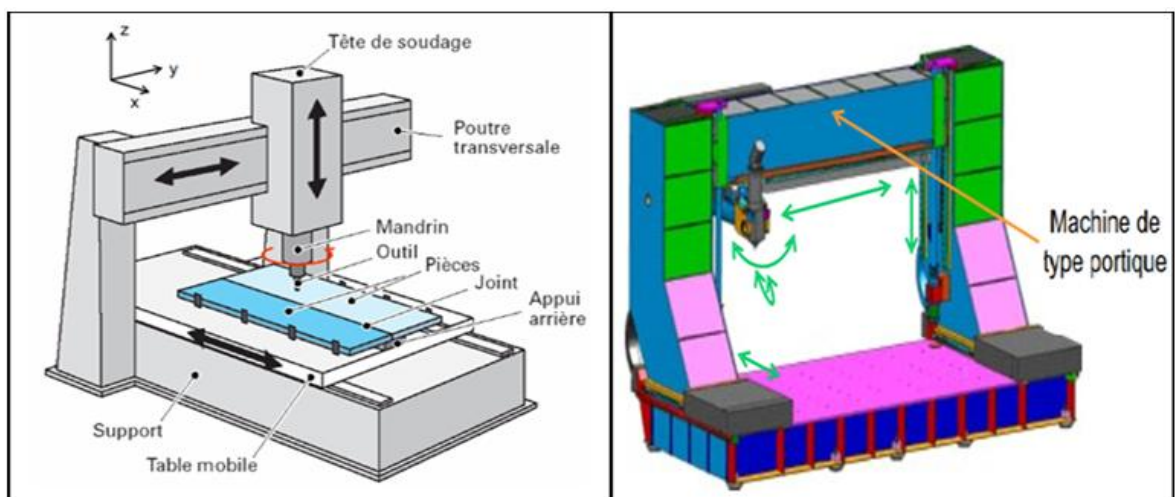


Figure II. 28: Schéma des machines-outils pour le FSW [34].

II.2.8 Les outils de soudage FSW

L'outil de soudage est sans doute l'élément le plus déterminant du procédé de soudage par friction malaxage. Il influence directement le malaxage et les déformations produites dans le matériau pendant le procédé, le choix de l'outil dépend du domaine d'application. La géométrie de l'outil influence la quantité de chaleur générée, l'écoulement du métal et l'énergie requise pour souder.

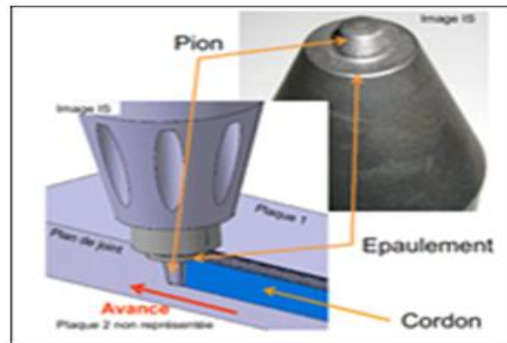


Figure II. 29 Forme d'outil pour le soudage FSW [34].

Cependant, plusieurs utilisateurs ont inventé et breveté des outils avec des géométries différentes afin d'améliorer la résistance de la soudure, de souder différents matériaux des composantes de différentes épaisseurs ou dans différentes configurations géométriques. Ainsi sont apparues les tiges avec nervures hélicoïdales, des géométries de sections variables, des épaulements nervurés et concaves, sans oublier les profils à deux et même trois gorges. Evidemment, la géométrie et le matériau de l'outil utilisé pour le soudage dépendent du type de la soudure à exécuter, la tige pénétrante doit avoir une longueur similaire à l'épaisseur de la pièce à souder [35].

L'épaulement est en contact direct avec les pièces à assembler. Il applique une pression à la surface des pièces assemblées. Son premier rôle est d'échauffer la matière par frottement. Celui-ci constitue la source principale de chaleur. De ce fait, la taille relative de l'épaulement par rapport au pion est primordiale. En théorie, le diamètre de l'épaulement doit être environ cinq fois supérieur à celui du pion [34].

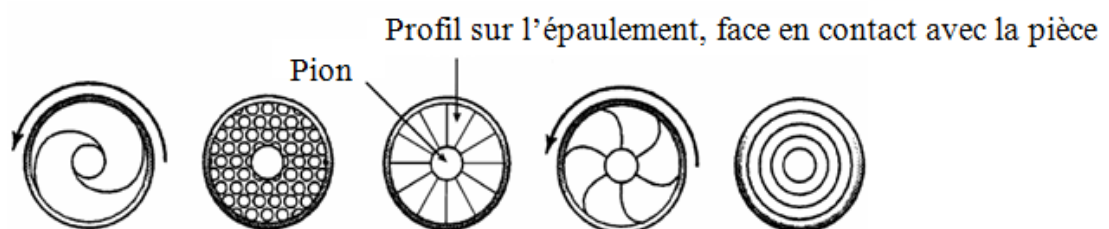


Figure II. 30 : Exemple de géométrie d'épaulement [34].

L'épaulement est souvent de forme concave pour éviter les débordements de matériau de part et d'autre de l'outil. De plus, en raison du frottement provoqué par cet épaulement, le matériau de l'outil doit être plus résistant à haute température que le matériau soudé. Par exemple, pour souder de l'aluminium, les outils sont généralement fabriqués en acier dur. FREDERIC [35] a cité les travaux de chercheurs qui ont étudié l'effet de la géométrie des outils, comme Padmanaban et Balasubramanian [36], qui ont soudé un alliage de magnésium (AZ31B) à l'aide de cinq profils de tige, trois profils d'épaulement ainsi que cinq matériaux différents (acier doux, acier inoxydable, acier de blindage, acier à haute teneur en carbone et acier rapide). Ils ont conclu finalement que l'outil fabriqué à partir d'acier à haute teneur en carbone a offert les meilleurs résultats. En théorie, le diamètre de l'épaulement doit être environ cinq fois supérieur à celui du pion, afin d'augmenter l'efficacité du frottement (sans augmenter le diamètre de l'épaulement), on peut sculpter des profils sur la surface de l'épaulement en contact avec la pièce. Des exemples de profils (rainures ou spirales) sont présentés sur la Figure II. 30, Ces profils usinés sur la surface de frottement permettent d'entraîner la matière vers le centre. Ceci permet de confiner un maximum de matière sous l'épaulement, en diminuant les bavures. Ce type d'épaulement est particulièrement efficace lorsqu'il est perpendiculaire aux surfaces soudées, car la surface de contact est maximale [34]. L'épaulement peut également être de forme conique ou concave. Ce dernier joue aussi un rôle d'entraînement de la matière. Suite au contact et à la pression importante de l'épaulement sur la pièce à souder, cette partie de l'outil engendre un flux de matière non négligeable. Pour preuve, la forme de la microstructure du cordon de soudure présente une zone à grains fins plus large en dessous de l'épaulement. La largeur de cette zone diminue graduellement en se rapprochant de la racine de la soudure. Le rôle de l'angle d'inclinaison dépend du type d'outil, L'opération de soudage est alors réalisée en inclinant l'outil d'un angle compris entre 2 et 3 degrés dans la direction opposée à celle de la direction d'avance. L'étude montre que si l'inclinaison de l'outil est inférieure à 1°, une rainure apparaît sur la surface du côté entrant du joint. Lorsque l'inclinaison est de 1,5°, la rainure disparaît et le joint prendra une belle apparence. Ce pendant, une coupe transversale du joint montre une cavité sous la surface du côté entrant du joint. À une inclinaison de 3,5°, le joint est exempt de défauts. A un angle de 4,5°, des bavures sont visibles à la surface du joint et des cavitations sont apparues du côté sortant du joint. Une inclinaison d'environ 2,5° aide à diminuer la présence de couche d'oxyde résiduelle et la série de lignes d'oxyde courbées espacées dans le noyau. Ces types de défauts sont

normalement associés à une faible dispersion des particules d'oxyde qui se trouvent originalement sur les surfaces des plaques et à une faible quantité du métal remué et ils réduisent les propriétés des joints SFM [37].

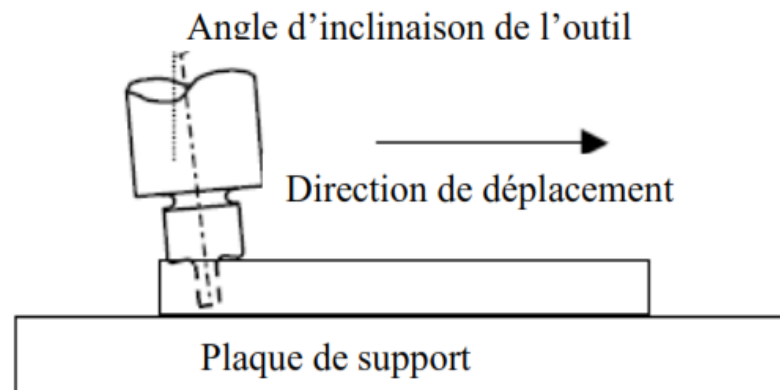


Figure II. 31: Angle d'inclinaison de l'outil [37].

Le pion a pour rôle de malaxer la matière plastifiée et de l'entraîner vers l'arrière afin de former le cordon. La géométrie du pion est également un facteur important en soudage par FSW. Le flux de matière, ainsi que les efforts générés au niveau du pion sont directement liés à sa géométrie qui conditionne de ce fait la microstructure, l'homogénéité du joint et les propriétés mécaniques de l'assemblage.

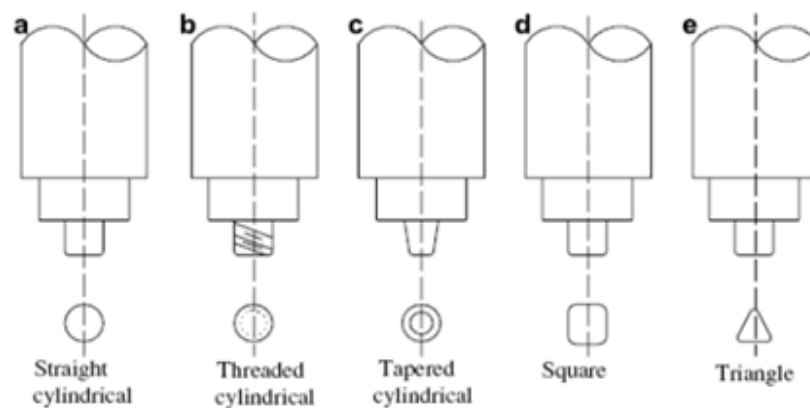


Figure II. 32 : Différentes géométries du pion [31].

Les dimensions du pion sont calibrées. Sa longueur détermine la pénétration de la soudure visée (l'épaisseur du cordon). Suivant les machines de soudage utilisées et selon le matériau soudé, la pénétration peut varier de 0,5 mm à plus de 35 mm en une seule passe et sans apport de matière. Pour des épaisseurs plus élevées, il est possible d'opérer en deux passes opposées.

Des études sont menées sur la géométrie du pion, pour optimiser l'opération de soudage et la

qualité de la soudure. Les formes de pions sont de plus en plus complexes. Les géométries des outils « Whorl-TM » et « MX-Triflute TM » sur la (Figure II.33), sont développées par TWI (l'institut de soudure britannique) sont de bons exemples [34]. Ces deux types d'outils sont ainsi qu'un outil de géométrie plus simple, « Trivex-TM ». Le pion « Trivex-TM » se compose de trois faces convexes avec ou sans filets. Cette configuration d'outil sans filets est communément utilisée pour la modélisation numérique du soudage par FSW.

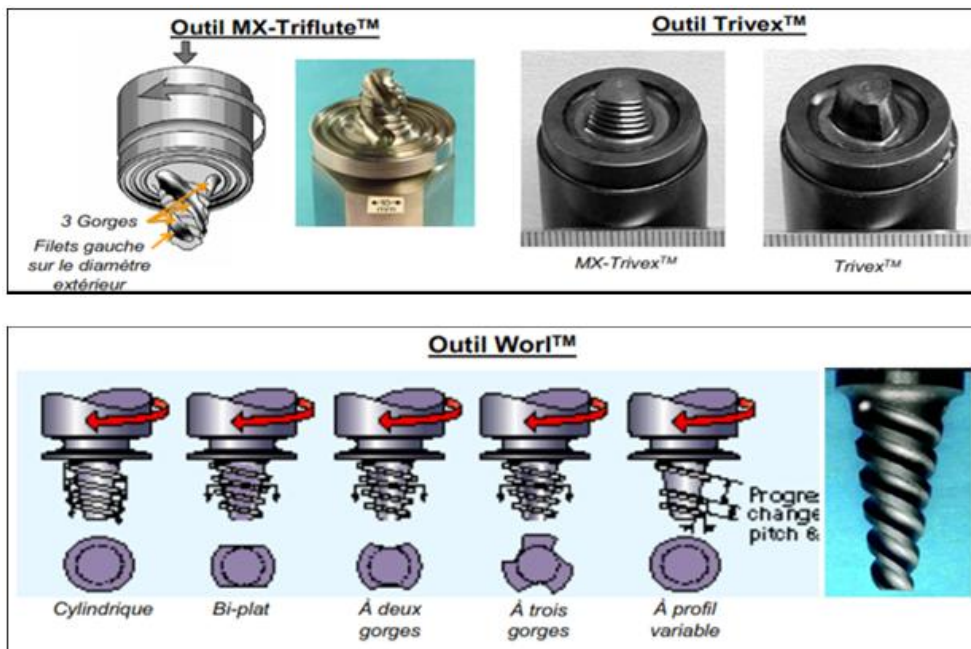


Figure II.33: Différent forme des pions d'un outil FSW [34].

II.2.8.1 Le soudage des matériaux par FSW

Les applications industrielles du FSW se concentrent pour l'instant sur des matériaux métalliques à bas point de fusion tels que l'aluminium et ses alliages, le cuivre et ses alliages, le magnésium, le plomb, le zinc, le titane et ses alliages et les aciers doux, grâce à leur ductilité ont également pu être soudés par FSW de manière expérimentale. Malheureusement, la durée de vie des outils ne permet pas, pour l'instant, d'applications industrielles. L'avantage majeur du procédé FSW est d'améliorer l'aptitude au soudage de l'aluminium et de ses alliages, une des possibilités offerte par ce procédé est de permettre le soudage de matériaux dissemblables comme, par exemple, l'aluminium avec du cuivre ou de l'acier. Un joint hétérogène est alors obtenu. Des études sont actuellement menées sur les propriétés métallurgiques et mécaniques obtenues. Ce potentiel est très important pour les applications industrielles. Un grand nombre de paramètres doivent être pris en compte dans l'opération de soudage de matériaux dissemblables par friction malaxage [34].

Plusieurs chercheurs travaillant sur des matériaux plastiques et les polymères, dont nous citons Adeel z. [38], dans sa thèse répertorient les résultats obtenus par de nombreux auteurs concernant les différents matériaux polymères et montre leur travaux comme par exemple Azarsa et al. [39] du souage du PEHD sur l'épaisseur 10 mm à une vitesse de rotation de 1400 tr / min et à 25 mm/ min, Bozkurt [40] les feuillard de PEHD, Inaniwa et al. [41] a rejoint le Nylon-6 de 5 mm d'épaisseur à une vitesse de rotation de 440 tr / min et à une vitesse minimale de 40 tr/mm vitesse de soudage avec un espace épaulement-pièce de 0,1 mm. Panneerselvam et al. [42] soudage Feuillard de nylon-6, Dashatan et al. [43] a montré la faisabilité de la jonction de polymères dissemblables par FSSW de PMMA et d'ABS.

Eslami et al. [44] ont signalé un rôle similaire dans les paramètres de soudage et ont essayé de rejoindre le PP avec PE. Comme étude Adeel (2016) dans sa thèse [45] le Nylon 6 où il présente la faisabilité du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) sur des plaques de Nylon 6 de 16 mm d'épaisseur, les résultats ont montré que la dépendance des valeurs de température et de traction sur les vitesses de rotation était insignifiante. Cependant, l'apparition de défauts considérables à des vitesses de rotation plus élevées, d'autres parts outre Paul Kah et al. [46] ont montré que les pièces fabriquées en combinant des matériaux différents tels que métal sur métal, polymère à polymère et métal sur polymère sont aujourd'hui très demandées, les joints métal sur polymère, en revanche, associent la résistance et la ductilité du métal, de plus à ce raison, Harikrishna [47] dans sa thèse prouve et conclus que le soudage des matériaux dissemblables est devenu possible, on peut assembler des plaques d'alliage d'aluminium et de polymères avec un soudage par friction-malaxage la résistance à la traction et la dureté des joints soudés étaient inférieures à celles des matériaux de base et la réduction de la dureté a été clairement observée dans la zone soudée du côté polymère. Et pour l'influence d'épaulement et le pion d'outil plusieurs chercheurs fait les études de recherche approfondis on citons à titre d'exemple Santosh K.[48], dans sa thèse qui a étudié l'effet de profil du pion d'outil (carrée et conique) soudage bout about sur les plaques en polymère PP sur l'épaisseur de 6mm puis a conclus que le pion de forme carrée a réussi à souder les plaques de PP, obtenant un maximum d'efficacité maximale de la soudure de 59,82% par rapport au matériau de base mieux qu'un pion de forme conique. Le choix du matériau de l'outil dépendra de la nature de l'alliage soudé, du type d'outil (opérations d'usinage plus ou moins importantes) et de la durée de vie souhaitée. Cette dernière est directement liée à la température de soudage et aux efforts engendrés au niveau du pion. Le matériau utilisé pour élaborer les outils

représente donc un facteur capital qui a un effet direct non seulement sur l'usure des outils mais aussi sur les paramètres opératoires et par conséquent sur le coût de la soudure. Banjare et les autres [59] ont conçus un outil assisté par une source de chaleur pour obtenir une meilleure finition de la surface de soudure et réduire la formation de copeaux et la perte de matière lors du soudage FSW pour plusieurs thermoplastiques, y compris le polymère PE, les résultats ont montré que la ductilité et la résistance à la traction des joints soudés étaient améliorées par rapport aux outils classiques, Cette conception proposée a permis d'éviter le manque de chaleur, cause de la fusion inappropriée et de la formation de vides lors de la FSW des thermoplastiques. Et pour cela Sandra Z. [58] a fait une étude et analyse dans sa thèse de doctorat cette conception d'outil où il outre un avantage que elle éloigne l'utilisation d'enclume à l'envers des pièces, et d'autre part Mirley et al. [60] ont utilisé le soudage FSW par un outil d'épaule non-rotationnel sur le PEHD, il ont montré que Les effets des paramètres de processus sur la résistance à la traction, dureté et cristallinité dans les joints soudés du PEHD, produisant des joints soudés sans discontinuités et surchauffe dans la zone de soudage, les résultats des essais de traction et la cristallinité de la région malaxé a été réduite a cause de changements physiques dans la structure du matériau polymère produite par transfert de chaleur et le flux de matière au cours de procédé de soudage. Nateghi et Hossein zadeh [63] ont étudié l'effet du pion, et de refroidissement assisté pendant l'opération de soudage des matériaux PE, PP, les résultats ont montré que la distorsion angulaire, la contrainte résiduelle et la résistance des joints FSW est améliorée à l'aide de refroidissement.

L'usure du pion et la durée de vie du pion dépendent principalement de la température de soudage et des sollicitations mécaniques subies par celui-ci durant l'opération de soudage. D'autres facteurs tels que la géométrie du pion, la nature du matériau soudé et les paramètres opératoires (vitesses de rotation et d'avance et l'effort de forgeage) ont également un effet sur la durée de vie de l'outil. Pour le soudage des métaux à bas point de fusion, tels que l'aluminium, les outils élaborés en acier ont une durée de vie suffisante pour permettre l'application industrielle du procédé. En pratique, l'usure des outils utilisés lors du soudage d'alliage d'aluminium commercial est tellement faible qu'elle peut être considérée comme nulle dans le cadre d'une étude à court terme. L'usure de l'outil dépend également de la dureté du matériau et de la présence de particules abrasives. A l'heure actuelle, des essais en laboratoire sur l'acier ont permis de réaliser 80 mètres de soudure sans rupture du pion. Pour diminuer les risques de rupture, des géométries d'outils plus adaptées sont utilisées ainsi que des matériaux d'élaboration plus

durs [31]. Les efforts en jeu lors du soudage par friction malaxages ont élevés et justifient l'utilisation d'un système de bridage très rigide. Par exemple, la Figure II. 34 présente l'effort de forgeage (F) ainsi que le couple (C), en fonction du temps de soudage, mesurés à l'aide d'un dynamomètre rotatif lors du soudage par friction malaxage de l'alliage 6005.

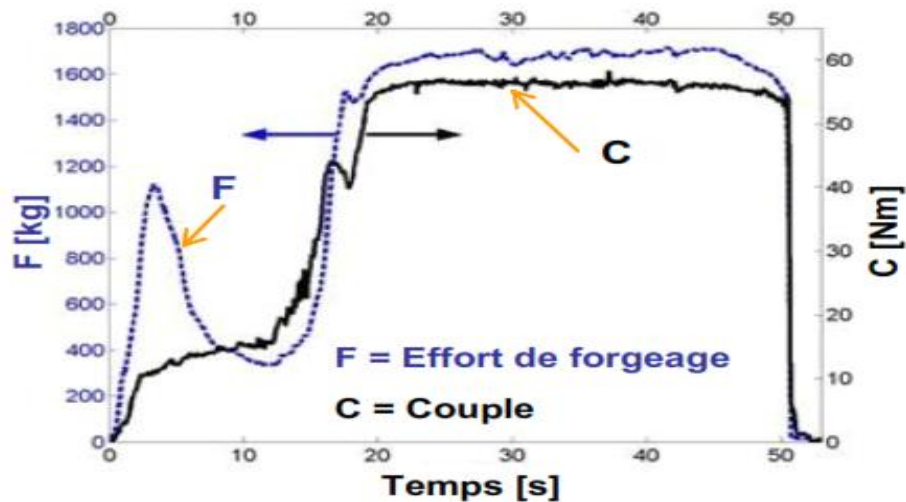


Figure II.34 : Mesure de la force F et du couple C lors d'un soudage par FSW [34].

On peut observer que la force verticale atteint un pic de 1150 kg lors la pénétration du pion de l'outil dans la matière (4 à 5 s). Au cours de l'échauffement de la matière par friction et par déformation.

II.2.8.2 Matériaux des outils de FSW

Différents matériaux ont été testés pour l'élaboration des outils (épaulement et pion): les aciers d'outil pour le soudage des matériaux à bas point de fusion (par exemple le X40CrMoV5-1 trempé jusqu'à 50HRC). Les cermets (matériaux frittés, résistants à haute température, préparés suivant les techniques de la métallurgie des poudres. durs et très réfractaires, résistant à la corrosion à chaud et servant de liant. Cette association de phases a pour but de rassembler dans un même matériau la résistance à l'oxydation à chaud, la ductilité et la résistance aux chocs thermiques),

les superalliages (alliages à base de chrome, de nickel et de cobalt, qui présentent une excellente résistance au fluage et une très bonne stabilité structurale à température élevée (800 à 1100°C),

le PCBN (Poly crystalline Cubic Boron Nitride) et les alliages à base de tungstène [31]. Ces matériaux sont principalement utilisés pour les outils de coupe en usinage.

Le choix du matériau de l'outil dépendra de la nature de l'alliage soudé, du type d'outil (opérations d'usinage plus ou moins importantes) et de la durée de vie souhaitée. Au cours

du soudage, les températures engendrées par le frottement de l'outil et les déformations plastiques subies sont importantes. La tenue mécanique à chaud des outils est limitée. Pour prolonger leur durée de vie, des fabricants ont élaboré des systèmes de refroidissement, comme celui développé par Méga stir présenté sur la Figure II.35.

Les équipements disposant d'un système de refroidissement sont principalement utilisés pour le soudage de l'acier et du titane. Certains d'entre eux peuvent également disposer d'un système permettant de protéger la zone soudée avec un gaz (argon) pour éviter l'oxydation du métal chaud. Il est à noter que pour l'instant, seuls les outils conventionnels (pour les quels le pion est solidaire de l'épaulement) peuvent être refroidis. La mise en place d'un système de refroidissement pour les autres technologies d'outils (outil à pion rétractable et «self reacting tool») est plus problématique [34]. La profondeur de pénétration de l'outil dans la matière dépend directement de la longueur du pion. Elle varie légèrement en fonction de l'inclinaison donnée à l'outil. L'épaisseur du cordon est quasiment égale à la profondeur de pénétration de l'outil, à 0.5 mm près. Une pénétration d'outil mal ajustée peut engendrer des défauts de soudure. Dans le cas où l'effort appliqué par l'épaulement sur les surfaces soudées n'est pas suffisant, le pion ne sera pas correctement immergé dans la matière et le matériau malaxé ne

Les roulements ainsi que la tête de l'outil sont refroidis. Le système est muni d'un thermocouple permettant de mesurer la température au niveau de l'outil et de capteurs pour Ce système est très utile en matière de recherche et développement.

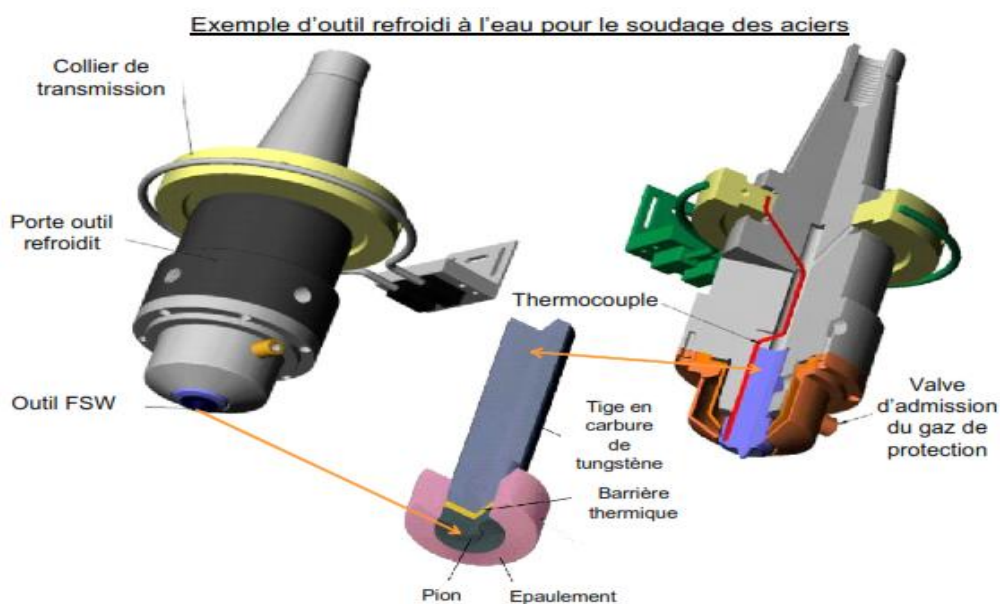


Figure II.35 : Schéma d'un système de refroidissement d'outil Megastir [34]. ;

Des défauts peuvent alors se former dans la soudure, tels que des manques internes de matière (cavités) ou des manques de liaison en racine. A l'inverse, si l'effort de forgeage est trop important, l'épaulement pénètre trop profondément dans la matière et engendre d'importantes bavures sur les bords du cordon et un amincissement de la tôle au niveau de la soudure, entraînant un affaiblissement des propriétés mécaniques [31].

La modélisation numérique est parfois utilisée pour optimiser les paramètres de soudage. Les modèles considèrent à la fois l'énergie générée par le frottement de l'outil et l'écoulement plastique du métal. La vitesse d'avance et la vitesse de rotation de l'outil sont des paramètres très importants qui influencent la qualité des joints FSW. La quantité de métal remué augmente avec l'augmentation de la chaleur. L'augmentation de la quantité de métal remué augmente la dispersion des particules d'oxydes diminuant ainsi la présence de défauts à la racine de la soudure [37]. Haijing Li et al. [61] ont remarqué les modifications de l'orientation des cristaux et le pourcentage de cristallinité sont également attendus, et ainsi qu'une réduction de la durée de vie, et aussi Hoseinlaghhab et les autres. [62] ont observé les effets de la vitesse de rotation et de soudage, la géométrie de l'outil et l'angle d'inclinaison sur les propriétés de fluage des joints FSW en PE, et insiste sur les meilleures propriétés de qualité de soudure et de fluage et basé sur le pion à géométrie cylindrique, d'autre part Azarsa et Mostafapour [39], ont étudié le soudage FSW sur des feuilletage en PEHD basé sur les paramètres de processus (rotation et vitesse de soudage élevée) et l'effet de la température de l'outil, la résistance à la flexion dans les joints soudés a donné les meilleurs résultats.

II.2.8.3 Propriétés métallurgiques des soudures obtenues

Dans la thèse, Nejah D. [31] montre à travers d'autres chercheurs que la dureté est parmi les caractéristiques qui peuvent qualifier un cordon et comprendre son histoire thermique. Le profil de dureté à travers la soudure change de forme selon le type d'alliage. Pour pouvoir malaxer la matière des pièces à souder, on doit ramener le cordon FSW à un état probablement proche de l'état « semi solide ». En pratique, il existe deux chemins permettant l'obtention d'une soudure :

La solidification partielle (en partant de l'état liquide) : cas du soudage par fusion et la fusion partielle (en partant de l'état solide) : cas du soudage mécanique

Dans le procédé du soudage par friction malaxage, on se base sur le deuxième mode d'obtention c'est-à-dire une fusion partielle (sans atteindre l'état liquide total), pour cela le

matériau doit être chauffé jusqu'à une température supérieure au solidus et inférieure au liquidus. La température maximale atteinte lors du processus de FSW peut varier entre 70% et 90% de la température de fusion pendant une courte durée. En FSW, la quantité de chaleur apportée à la matière est due à plusieurs phénomènes physiques. Ces phénomènes sont réduits principalement au frottement et à la quantité de chaleur de déformation. Ces deux aspects fortement couplés rendent la modélisation du procédé difficile. Diverses tentatives ont été faites pour la compréhension des mécanismes exacts de génération de la chaleur en se basant sur des modèles numériques et analytiques.

II.2.9 Phénomènes physiques observés dans le procédé de soudage

Les divers phénomènes physiques, mis en jeu pendant le soudage par FSW, sont de trois types mécanique, thermique et métallurgie.

Pour le type mécanique en général, les phénomènes mécaniques sont dus au frottement à l'interface entre l'outil et les pièces soudées et à la déformation plastique du matériau. La source de frottement est le contact de l'outil en rotation avec le matériau. Le frottement est caractérisé par une contrainte de cisaillement à l'interface. La déformation plastique trouve sa source dans le mouvement du matériau en rotation sous l'effet du frottement à l'interface outil plaques et dans le malaxage dû au pion. La déformation plastique est importante dans la région située sous l'outil [49]. Pour le type thermique, les deux phénomènes thermiques principaux au cours du procédé FSW sont la génération et la conduction de la chaleur. La génération de la chaleur vient d'une source de chaleur surfacique due au frottement à l'interface et une source volumique due à la déformation plastique du matériau. La répartition de la génération de la chaleur entre ces deux sources dépend de la condition de contact entre l'outil et le matériau. En effet, pour un contact presque collant, la chaleur est principalement générée par la déformation plastique du matériau. Par contre, pour un contact glissant, la plus grande partie de la chaleur est créée par le frottement. La chaleur générée est transférée principalement par conduction. Le transfert par conduction dans les pièces soudées dépend d'une part de la conductivité thermique du matériau soudé, par exemple, l'aluminium est caractérisé par une grande conductivité thermique, ce qui contribue à évacuer rapidement la chaleur créée, et d'autre part de la chaleur évacuée dans la plaque support et dans l'outil c'est-à-dire la résistance des interfaces de contact aux transferts thermiques. Finalement, la chaleur est évacuée aussi par convection entre l'outil, les deux plaques à souder, la plaque support avec le milieu extérieur (ambient) [49]. Pour le type métallurgie, les

phénomènes mécaniques et thermiques, dans l'ensemble des procédés de soudage par fusion, entraînent une modification de la microstructure du matériau de base et ses propriétés mécaniques. Cet inconvénient provient des phénomènes métallurgiques qui apparaissent lors du soudage et qui représentent le lieu de concentration des contraintes dans le cas des sollicitations externes. Le premier phénomène métallurgique est la modification de l'état de précipitation du matériau. Le second est la recristallisation du matériau [49].

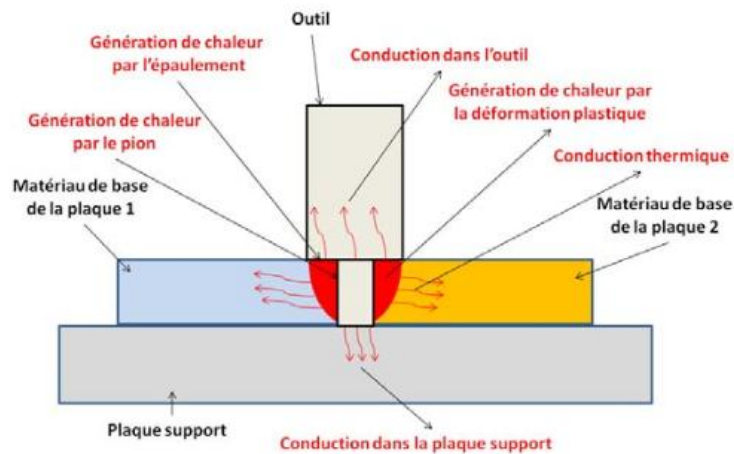


Figure II.36 : Transferts thermiques induits par le procédé FSW [49].

Le procédé de soudage FSW permet au contraire d'obtenir des modifications métallurgiques moins importantes, par rapport aux autres procédés, causées par les différents changements de phase au cours de soudage. Une coupe transversale du joint soudé permet d'obtenir les différentes zones dans lesquelles la matière est affectée thermiquement (Heat Affected Zone HAZ) ou thermo-mécaniquement (Thermo-Mechanical Affected Zone TMAZ). Chaque zone dépend de la température atteinte, des modifications métallurgiques et des déformations subies au cours du procédé de soudage [49].

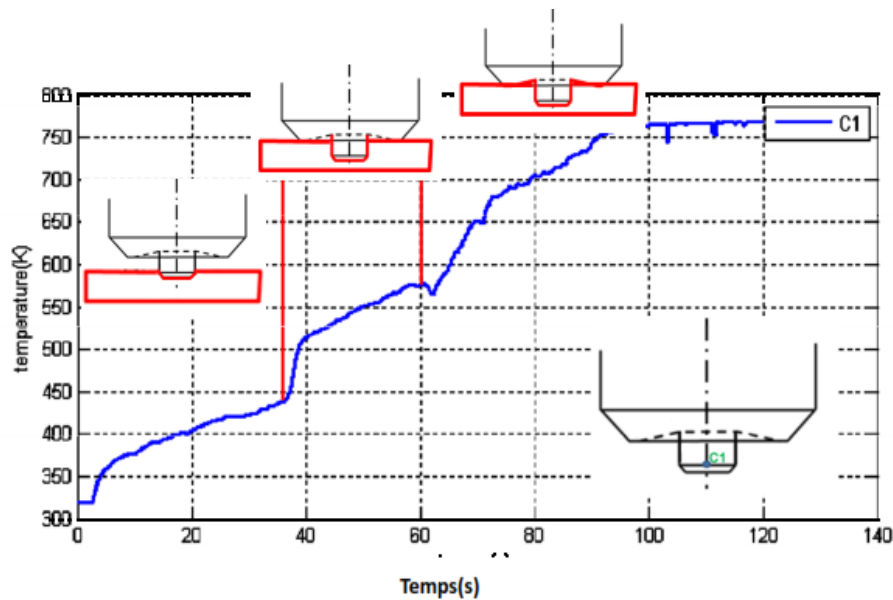


Figure II.37 : Schéma d'évolution de la température aux cours des différentes étapes [31].

Meyghani [55] a fait une étude expérimentale concernant le comportement thermique au cours du processus FSW sur la réduction des coûts et le temps nécessaires, et ainsi l'approche de modélisation numérique du processus FSW est très complexe. Il a résumé que, le sondage a indiqué que la méthode lagrangienne convient à la modélisation de la composante structurelle. D'autre part Vijayan et coll. [56] montre que les thermoplastiques (y compris le PE) sont généralement soudés à processus qui impliquent certaines des conditions suivantes: conduction par la chaleur (soudage à la cale chauffée), rayonnement par la chaleur (tels que le soudage par laser) et des frictions mécaniques (ultrasons, vibrations et soudage par rotation), et le FSW appartient au dernier groupe (friction mécanique), d'autre part Lai et les autres [57], étude le, soudage du PE par faisceau d'électrons et soudage bout à bout, soudage par fusion, a montré que d'orientation des cristaux) sont présents dans les joints soudés.

II.2.9.1 La formation du cordon de soudure

Les modifications métallurgiques intervenant lors du soudage par FSW affaiblissent les propriétés mécaniques de l'assemblage par rapport à celles du métal de base. Ce pendant, le soudage à l'état solide permet de limiter les modifications microstructurales, et permet donc de limiter la génération de contraintes résiduelles par rapport aux autres procédés dans lesquels le cycle thermique est nettement plus sévère [50]. Le joint obtenu avec les procédés de soudage conventionnels présente généralement un noyau correspondant à une zone de fusion et une zone affectée thermiquement dans la quelle la microstructure a

fortement évolué. Le soudage FSW présente la particularité de générer quatre zones identifiées par observation au microscope optique (Figure II.38) :

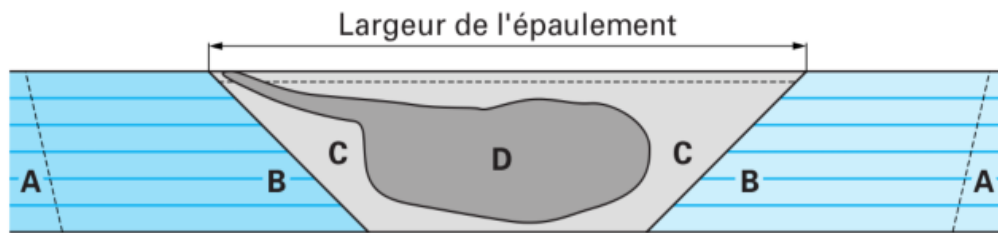


Figure II.38 : Schéma d'une coupe transverse de soudure FSW [50].

Zone A (Le métal de base) : Ses propriétés mécaniques globales ainsi que sa microstructure sont restées inchangées au cours du procédé (ZB).

Zone B (La zone affectée thermiquement (ZAT)) : Dans cette zone, le métal a subi une élévation de température affectant la microstructure et les propriétés mécaniques, mais de façon relativement modérée. Les déformations sont par contre quasi-inexistantes.

Interface des deux plaques
avant soudage

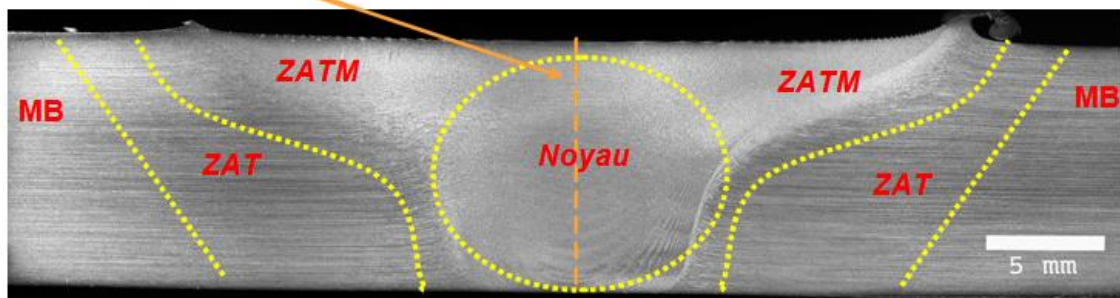


Figure II.39 : Macrographie d'une soudure FSW d'un alliage d'aluminium [51].

Zone C (La zone thermo-mécaniquement affectée (ZTMA)) : Encadrant le noyau soudé qui a subi un cycle thermique et des déformations mécaniques. La température est suffisamment élevée pour entraîner des modifications microstructurales significatives.

Zone D (Le noyau) : C'est une région dans laquelle la matière a été sévèrement déformée. Cette zone ayant subi une recristallisation dynamique, les grains quasi-équiaxes sont beaucoup plus fins que dans le métal de base. Il apparaît dans cette zone malaxée des structures allongées en bandes concentriques dont l'origine reste à confirmer [50].

Une des contraintes liées au procédé de soudage FSW concerne les configurations possibles de joints soudés. En effet, celles-ci sont limitées à des géométries relativement simples en raison notamment du bridage des pièces qui doivent être fermement maintenues en position durant l'opération de soudage. Il faut par ailleurs prévoir une accessibilité suffisante pour le passage de l'outil massif monté sur une broche. Néanmoins, de nombreuses applications sont réalisables et la possibilité de souder selon des trajectoires curvilignes ou circulaires élargit le champ des applications [34].

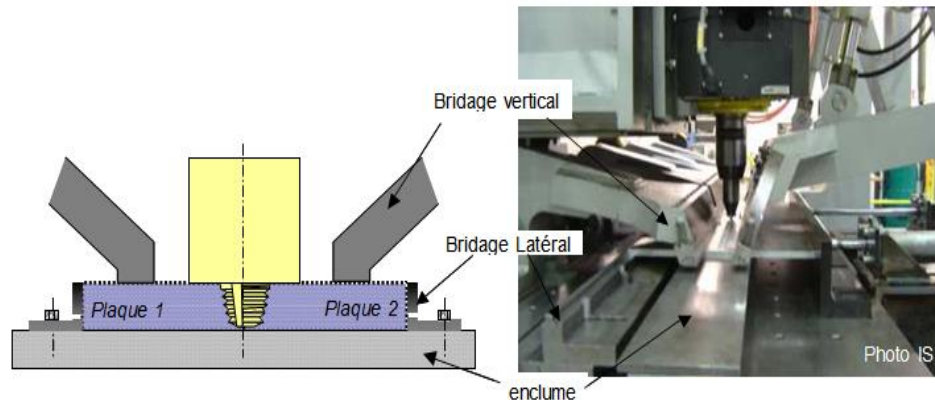


Figure II.40 : Système de bridage en soudage FSW [51].

a-Etat de surface des joints soudés

Malgré la simplicité de la mise en œuvre de ce procédé, il existe plusieurs paramètres qui agissent sur la qualité du joint de soudure. Si ces paramètres ne sont pas optimisés, des défauts comme les porosités, les criques de refroidissement et des bavures peuvent être formés. De diverses combinaisons de choix de ces paramètres peuvent conduire au même type de défauts, d'où la difficulté pour qualifier un domaine de soudabilité. Plusieurs recherches sont réalisées pour identifier la relation entre ces paramètres et leurs influences sur la qualité mécanique et métallurgique du joint de soudure [31].

b-Bavures

La formation de bavures est fonction des paramètres opératoires et des matériaux assemblés. L'optimisation des paramètres de soudage permet généralement de limiter l'apparition de bavures. Mais celles-ci sont parfois inévitables. Il faut alors les supprimer par une opération post-soudage [34].

c-Rugosité

La rugosité de la surface d'une soudure par friction malaxage peut être assez variable selon la matière et les paramètres de soudage. En guise d'illustration, les Figures II.40 (a) et (b)

présentent une gamme de rugosité que peuvent présenter les cordons de soudure FSW. Bien que la soudure soit considérée comme acceptable (Figure II.40 (a)), l'alliage EN AC-460000-F soudé à une vitesse de rotation de 700 tour/min et une vitesse d'avance de 350 mm/min présente un écart moyen de rugosité (R_a) de 10,23 μm . La moyenne arithmétique de la hauteur des irrégularités (R_z) est de 55,01 μm avec une irrégularité maximum (R_{max}) de 73,14 μm . L'alliage 6005-T6 soudé à une vitesse de rotation de 2000 tour/min et une vitesse d'avance de 200mm/min présente une faible rugosité ($R_a = 1,82\mu\text{m}$). La moyenne arithmétique de la hauteur des irrégularités (R_z) est de 7,2 μm avec une irrégularité maximum (R_{max}) de 7,77 μm [34].

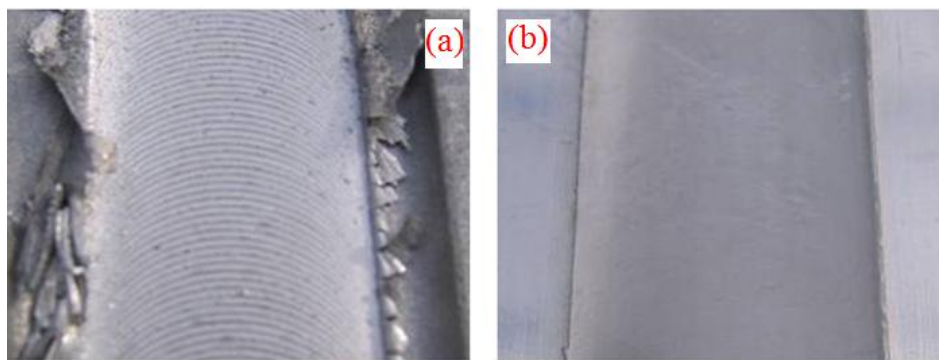


Figure II.41: Surface d'un cordon de soudure FSW [34].

Généralement, une opération post-soudage n'est pas nécessaire, excepté dans certains cas pour des exigences esthétiques. Il est parfois possible d'appliquer une couche de peinture sur le cordon à l'état brut.

II.2.9.2 Distribution des températures

Même si la température de fusion des métaux soudés n'est pas atteinte, le soudage par FSW occasionne tout de même une montée en température au sein du matériau. On rencontre comme dans toute opération de soudage une zone affectée thermiquement, mais sa largeur est réduite par rapport aux procédés par fusion [34].

II.2.9.3 Contraintes Résiduelles

Lors du soudage par fusion, les contraintes résiduelles avoisinent généralement la limite d'élasticité du matériau de base. Bien que controversé, on peut penser à priori que les contraintes résiduelles sont plus importantes pour le procédé FSW que celles engendrées lors du soudage par fusion. Le bridage plus rigide des pièces assemblées empêchant toute mobilité, donc toute dilatation, entraînerait des contraintes internes plus élevées. Les propriétés mécaniques de l'assemblage soudées, notamment sa tenue en fatigue, sont

directement liées aux contraintes résiduelles [34].

Des études ont été menées pour mesurer les contraintes résiduelles de soudure FSW. Apparemment, les contraintes résiduelles seraient, malgré le bridage rigide, plus faible que celles rencontrées lors du soudage par fusion. Par exemple, le soudage par friction malaxage mène à des contraintes résiduelles de l'ordre de 80 à 100 MPa pour l'alliage 2024, alors qu'elles approchent les 200 MPa pour le soudage MIG. La Figure II.55 présente les résultats de mesures de contraintes résiduelles effectuées sur un alliage 6013-T4 [34]. Dans cette étude, on peut constater que le long du joint (sens longitudinal) les contraintes résiduelles sont supérieures à celles rencontrées perpendiculairement au joint (sens transversal). De plus, les contraintes résiduelles longitudinales présentent une distribution caractéristique en forme de «M», plus ou moins prononcée selon l'alliage soudé et les paramètres opératoires. La Figure II.39 montre schématiquement l'allure des contraintes à l'intérieur du cordon.

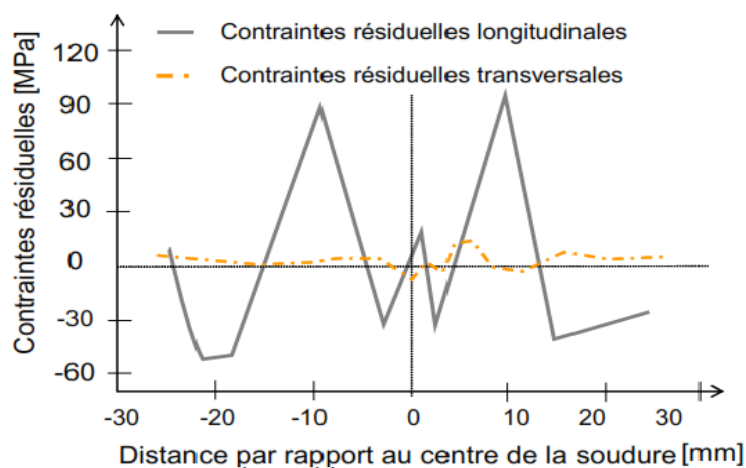


Figure II. 42: Distribution des contraintes résiduelles après soudage Par FSW de l'alliage 6013-T4 [34].

Les contraintes résiduelles sont négligeables dans le sens transversal. Par ailleurs, il a été démontré que la variation de la vitesse de rotation (à vitesse d'avance constante) n'influençait pas l'ordre de grandeur des contraintes résiduelles. Les contraintes résiduelles ne dépasseraient pas 20 à 30% de la limite d'élasticité du matériau de base [34].

Les contraintes résiduelles des joints soudés par friction malaxage ont également été étudiées à travers l'épaisseur de la plaque. Contrairement aux procédés classiques, les contraintes résiduelles suite au FSW ne sont pas maximales en surface. Elles présentent habituellement une valeur négative du côté avance, allant de (-15 à -40 MPa). Ensuite, les

contraintes résiduelles augmentent avec la profondeur pour devenir positives et atteindre des maxima de 50 à 150 MPa. Ces contraintes maximales atteignent typiquement 15 à 30% de la limite d'élasticité des matériaux de base, alors que celles-ci peuvent atteindre plus de 200 MPa pour les soudures par fusion des matériaux étudiés, c'est à dire 50 à 60% de la limite d'élasticité. Une fois encore, les paramètres opératoires tels que la vitesse de rotation ou d'avance ne semblent pas influencer significativement les valeurs des contraintes résiduelles [34].

II.2.9.4 Flux de chaleur

La génération de la chaleur dans le procédé FSW est la conséquence de plusieurs phénomènes physiques. Les sources de chaleur, induites par ces phénomènes, peuvent être classées comme suit :

II.2.9.5 Interaction outil-pièce :

Cette interaction est la source d'un flux de chaleur surfacique à l'interface outil-matière. La surface sur laquelle est appliqué le flux peut varier d'un disque de rayon égal à celui de l'épaulement situé sur la face supérieure des tôles à une surface plus complexe tenant compte de l'angle d'inclinaison de l'épaulement et la surface du pion. Le flux de chaleur peut être calculé à partir de la chaleur dissipée par frottement ou à partir de la puissance totale fournie à l'outil. Pour ces deux cas, il faut déterminer expérimentalement le coefficient de frottement pour le premier et la puissance totale fournie à l'outil pour le deuxième [49].

II.2.9.6 Déformation plastique du matériau :

La chaleur générée par la déformation plastique n'est pas négligeable. La première approche pour approximer le flux de chaleur dans la modélisation thermique du soudage par FSW est basée sur des mesures expérimentales de la température au cours du soudage afin de déduire un flux de chaleur comme le montrent Dickerson et al. (2003) et Simar et al. (2004). Dans ce cas, les auteurs ne s'intéressent pas à la prédiction de la chaleur mais uniquement à son effet. Ainsi, Chao et al. (1999) considèrent une source de chaleur mobile représentant l'action de l'outil sur les tôles à souder [49].

La deuxième approche s'appuie sur une formulation analytique qui permet de déterminer le flux de chaleur comme le montrent Chen et Kovacevic (2003). Dans ce cas, on s'intéresse seulement à l'effet thermique de l'outil qu'on n'a pas besoin de modéliser. De leur côté, Feng et al. (1998) utilisent l'équation de Rosenthal pour décrire le champ de température en régime stationnaire dû à une source de chaleur ponctuelle se déplaçant à une

vitesse constante. Song et Kovacevic (2002) proposent un modèle basé sur un système de coordonnées mobile afin de simplifier la modélisation de mouvement de l'outil [49].

II.2.9.7 Les défauts de vide du soudage

Pendant l'avance de l'outil, un tunnel est creusé derrière celui-ci. Lorsque le tunnel n'est pas correctement rempli par la matière entraînée en rotation par l'outil, un vide subsiste dans la soudure. La matière est entraînée en rotation de deux manières pour remplir le tunnel [52] :

a) Le premier flux, au pied de la soudure, est le mouvement en rotation occasionné par le pion, et qui est à l'origine des structures en bandes. Si l'entraînement au pied de la soudure n'est pas assez intense, le tunnel est rempli seulement du côté retiré et un vide subsiste du côté avancer. Cependant, si l'entraînement au pied de la soudure est assez intense, tout le tunnel est rempli et aucun défaut de vide ne se trouve dans la soudure. Un troisième cas peut se présenter si l'entraînement en rotation est trop intense. Il s'agit d'un raclage de la matière derrière le pion par ce dernier qui cause un défaut de vide du côté retirer de la soudure tout en formant une structure en bandes qui s'étend le long du côté avancer du pied de la soudure jusqu'en mi-hauteur comme on peut l'observer sur la Figure II.42, [52].

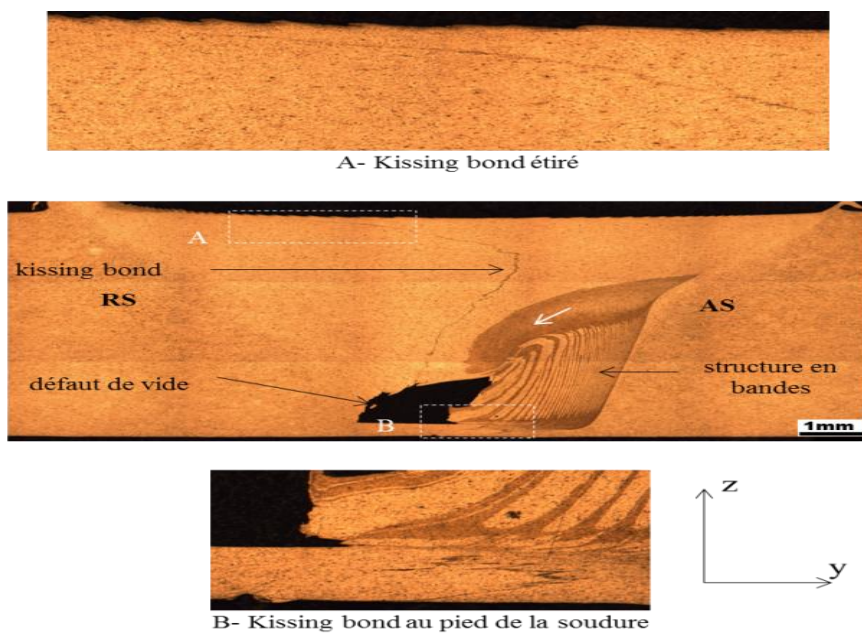


Figure II. 43: Les éléments de la microstructure observés dans la coupe transversale [52].

b) En outre, l'entraînement en hauteur (deuxième flux), lorsqu'il est complet, peut

initier un mouvement vertical de la matière tendant à remplir le vide subsistant au pied de la soudure, le tunnel est déjà rempli à proximité de la surface des tôles, le surplus de matière à ce niveau est refoulé au pied de la soudure pour combler le vide qui s'y trouve. La matière suit donc un circuit qui avait et en effet, la matière comprimée au pied de la soudure du côté avancer remonte au niveau de l'épaule qui l'entraîne en arrière du pion, où sous l'effet du gradient de pression entre le vide et le cumule de matière en hauteur, elle est drainée vers le bas pour combler le couloir laissé par l'outil. C'est ce drainage qui occasionne la courbure du dessus de la structure en bandes. En réalité, les défauts de soudure ne se localisent pas uniquement au pied de la soudure. On peut avoir des défauts de soudure en hauteur de la soudure. La position des défauts dépend non seulement des vitesses de soudage mais aussi de la géométrie de l'outil [52].

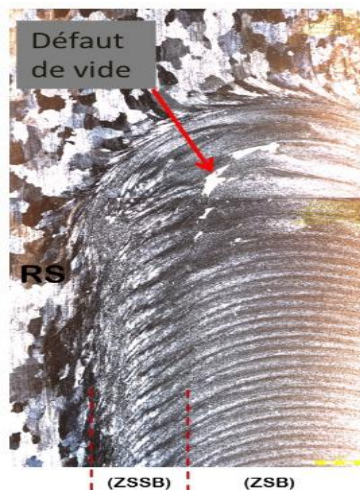


Figure II. 44: Observation de Défaut de vide sur le cordon de soudage [52].

II.2.9.8 Prédiction des défauts de soudure

La qualité d'une soudure se distingue par l'absence de trous tunnels, de porosités, de bavures ou de flashes c'est-à-dire des bavures de tailles plus importantes. Il est possible de modéliser de tels défauts lorsque l'approche numérique utilisée permet de suivre l'évolution de la surface libre du domaine et qu'un contact unilatéral modélise l'interface entre l'outil et la tôle. Les méthodes en question reposent sur des formulations lagrangiennes et ALE. Ce suivi de surface libre permet de modéliser l'apparition de bavures et d'en comprendre la formation. En suivant le mouvement des particules, on pu observer que lors de la création de bavures, les particules en rotation sur le bord de l'épaulement étaient déposées du côté de la zone retrait car elles n'entraient pas sous

l'épaulement [53].

Afin de modéliser les décollements qui vont entraîner la formation de trous en arrière du pion, il est nécessaire d'utiliser un contact unilatéral autorisant la matière à bouger dans la direction normale à l'outil (tandis que son déplacement dans la direction tangentielle est régi par la loi de frottement). L'approche lagrangienne, permet ainsi de modéliser un trou tunnel (voir Figure II. 45). Certains auteurs expliquent sa création à l'aide du champ de déformations des particules placés autour de l'outil.

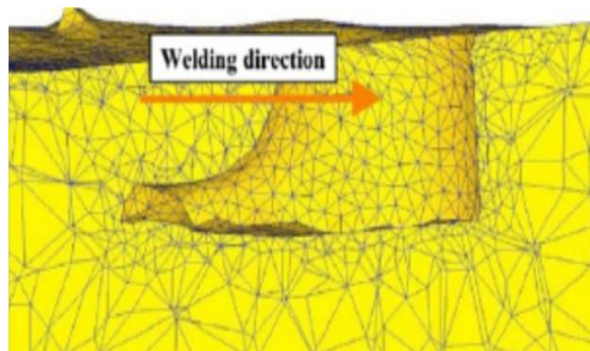


Figure II. 45: Trou tunnel en arrière de pion simulé numériquement [53].

De même, l'approche ALE permet de modéliser ces trous tunnels mais à moindre coût de calcul. D'autres chercheurs ont ainsi validé leur modèle en termes de température dans la plaque, de force et de couple dans l'outil pour obtenir une bonne corrélation avec l'expérience, avant de modéliser un trou en arrière de pion. Malgré le fait que la formulation eulérienne ne permette pas de modéliser ces décollements, ont pu les estimer au travers de l'évolution de la fraction volumique de porosité. A l'instant initial ils ont considéré une fraction volumique de 0.01% de porosité dans le matériau de base ; celle-ci évolue au cours du soudage et principalement à l'arrière du pion du côté de la zone d'avance où des valeurs de porosité maximales sont observées [53].

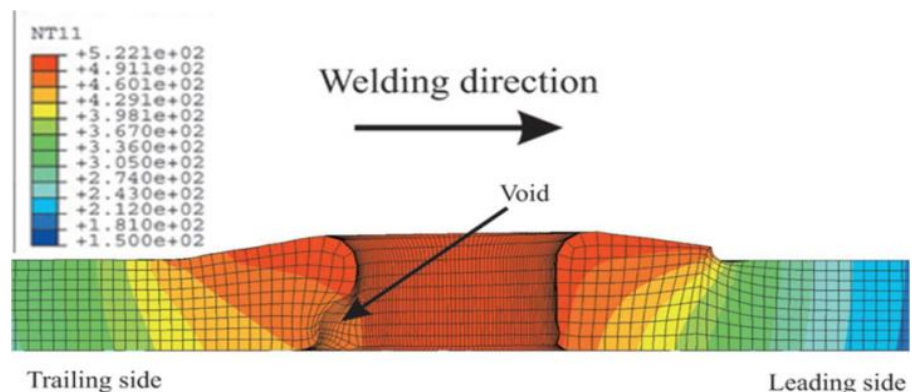


Figure II. 46 :Formation d'un trou à l'arrière du pion [53].

II.2.9.9 Principaux domaines d'application

Le procédé de soudage FSW est principalement utilisé dans l'industrie de la construction et du transport, telle que l'industrie spatiale, aéronautique, ferroviaire, automobile, maritime... Une liste non exhaustive d'applications du procédé dans différentes industries est présentée ci-dessous. De nouvelles applications voient constamment le jour. Le procédé de soudage par friction malaxage est appelé à connaître un développement important dans les prochaines années.

a- Dans le domaine spatial

Les soudures longitudinales et circulaires des réservoirs à oxygène liquide de la fusée Boeing Delta II et IV sont réalisées avec le procédé de soudage par FSW. En août 1999, la fusée Delta II, possédant des réservoirs soudés par FSW, mettait en orbite 4 satellites de télécommunication [34].

b- Dans le domaine automobile

Les portes arrière du modèle Mazda Rx-8 (Figure II. 46), composées de panneaux d'aluminium, sont soudées par points par le procédé FSW robotisé. D'autres constructeurs automobiles comme Ford utilisent ce procédé pour l'assemblage d'éléments au niveau de la suspension ou d'ouvrants comme les capots, portières en substitution des techniques plus classiques comme le clinchage ou le rivetage.



Figure II.47 : Application du FSW sur le Mazda Rx-8 [34].

c- Dans l'industrie aéronautique

Dans ce secteur industriel, le facteur poids est capital. Le procédé de soudage FSW a un avantage considérable en matière de diminution du poids des structures, facteur influençant directement la consommation en carburant des appareils. Le procédé de soudage FSW offre une alternative au rivetage systématique des différents ensembles. De plus, il permet une

réduction du temps d'assemblage par rapport au rivetage automatique. Une application a déjà vu le jour en production de pièces de voilure et de fuselage. En effet, la société américaine Eclipse Aviation Corporation a intégré le procédé FSW dans la fabrication d'un jet, l'Eclipse 500, permettant ainsi la suppression de 60% des rivets. La Figure II.47 présente une voilure d'avion soudée par FSW.



Figure II.48 : Assemblage de l'avion Eclipse 500 avec le procédé de soudage FSW [31].

Airbus a également prévu de mettre en œuvre ce procédé pour le soudage de certaines parties de l'A340 dès 2007 et sur le A350 [34].

d- Dans le domaine du nucléaire

Des études sont en cours en Suède pour le soudage par FSW d'un couvercle de containers en cuivre, destinés à l'enfouissement des déchets hautement radioactifs.

e- Dans le domaine ferroviaire

Les fabricants européens (ALSTOM, SAPS, ...) et japonais (Hitachi) de tramways et de trams utilisent le FSW pour le soudage des profilés d'aluminium extrudés. Il a été montré lors des tests de crash que la tenue des rames soudées par FSW est améliorée. Les fabricants ont trouvé avec le procédé FSW un moyen de souder des profilés en aluminium longs en limitant les déformations. Le train, développé et fabriqué par Hitachi représenté sur la Figure II. 26, est composé de profilés d'aluminium soudés par FSW sur toute la longueur [34].

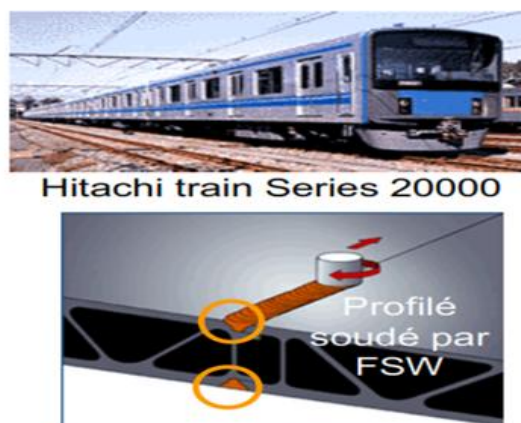


Figure II. 49: Soudage de profilé du train Hitachi [34].

f- Dans le domaine naval

Parmi d'autres applications, on notera qu'en 1995 Tendsetters, une société scandinave d'aluminium extrudé a été la première à appliquer le soudage par malaxage commercialement pour la fabrication de panneaux creux d'aluminium trempé. Ces panneaux ont notamment été utilisés pour la structure de ponts de bateau. De nos jours, les structures légères fabriquées par soudage par friction malaxage ont révolutionné la construction des ferries à grande vitesse, des bateaux de croisières et des hovercrafts (Figure II.48) [34].



Figure II. 50 : Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destiné au pont du bateau de croisière "The World" [34].

Conclusion :

Cette partie présente une analyse bibliographique sur le soudage FSW dans le but d'approfondir les connaissances sur les nombreux paramètres et mécanismes présents lors du soudage FSW et ses applications, et ainsi les matériaux exploités surtout dans le domaine des polymères et leur dérivés sont discutés à partir des travaux réalisés dans ce contexte. Des conclusions ont été tiré suite aux résultats trouvés par plusieurs chercheurs dans le domaine de soudage qui ont rendus cet axe plus intéressant.

Bibliographie

- [1] Klas W. Dunod ; Procédés de soudage, Aide-Mémoire, Paris, 2012
www.dunod.com, consulté mars 2014.
- [2] J. Duroux et R. Faucard ; Technologie Générale Et De Construction Métallique-
Tome1 ; cours de formation professionnelles, consulté le 20 Mars 2014.
- [3] Technique d'assemblage: Guide méthodique Micro-mécanicien, chapitre 6 ,Convention
patronale de l'industrie horlogère suisse,édition 2007.
- [4] SWISS-MECHANIC-PARIS ; Formulaire Technique d'assemblage : 4^{ème} édition juin
2009- chapitre 6, n°d'art.2607 f.
- [5] Société Tox. Presso Technik ; Fiche technique et brochure de Systèmes d'assemblage,
Clinchage-Tox. Presso technik , Germany ; www.tox-fr.com - consulté Mai 2014.
- [6] Frettage : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Frettage> – consulté le 16 Mai 2014.
- [7] Boutoutaou Hamid; Etude d'un emmanchement fretté compte tenu de l'effet combiné
des défauts de forme et d'état de surface; Thèse de doctorat en construction mécanique,
Université de bourgogne, France, 2012.
- [8] Nicolas LE MAOUT ; Analyse des procédé de sertissage de tôles métalliques ; Thèse de
doctorat, Université de Bretagne, Mars 2009.
- [9] Hubert SIMON ; Assemblage par collage, Techniques de l'Ingénieur ; traité Plastiques
et Composites; A 3758-1, docteur en Sciences Physiques Responsable de Recherche et
Développement des Adhésifs Structuraux – Ciba Polymères.
- [10] Philippe COGNARD ; Colles et adhésifs, Technique d'ingénieur: A 9 825-2: Ingénieur
de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle- Paris.
- [11] ECAM DE LYON ; Pole matériaux et structure, Ecole catholique des métiers - Lyon
–France. Consulté Mai 2014 ; sur <http://materiaux.ecam.fr/chartographique>.
- [12] Jean Claude Prévôt ; Le collage : Une technique d'assemblage industrielle, Dossier
technologique des Pays de Savoie. (ECAM). Lettre de l'Aram n° 6 . (Source : ECAM).
www.agmat.asso.fr . Consulté avril 2014.
- [13] S. BENZAADA; Fonderie et Soudage :(Pdf), Université de Biskra -Consulté avril
2014 . www.academia.edu/17752837/Moulage_et_soudage
- [14] Catalogue de la Soudure oxyacétylénique - Académie de Nancy-Metz
<http://www.chez.com/soudage.2000pdf> .Consulté le 20 Juillet 2014.

- [15] jean Maton ; Cours sur le soudage à l'arc électrode enrobée, www.rocdacier.com/.../cours-sur-le-soudage-a-l-arc-électrode-enrobée...fichierRocd@cier; consulté le 25 Aout 2014.
- [16] Jean-Pierre Planckaert; Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc, Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy 1, 1er juillet 2008.
- [17] Sylwia Zielinska ; Propriétés physiques du plasma MIG-MAG , Thèse de doctorat , université d'Orléans (France), 2005.
- [18] Assemblage des matériaux par soudage Technique d'ingénieur Réf. Internet : 42512 Edition T.I© octobre 2010; Article consulté le 10 Aout 2014.
- [19] Le Soudage TIG , Guide de soudage par « THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY » ; www.lincolnelectric.eu Réf : FE100.26 08/11; guide consulté le 04. Oct. 2014.
- [20] Groupe CETIM ; Applications du soudage par faisceau d'électrons - Cetim Dossier de soudage par : Le Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de constructio; [http// : www.cetim.fr/fr/.../Applications-du-soudage-par-faisceau-d-electrons](http://www.cetim.fr/fr/.../Applications-du-soudage-par-faisceau-d-electrons); consulté le 05 Oct 2014.
- [21] Soudage par faisceau d'électrons Image du Wikipédia source de site wikipedia.org/wiki/Soudage_par_faisceau_d'électrons consulté le 04 octobre 2014 .
- [22] Centre d'Etude CEWAC ; LES DIFFERENTS PROCEDES DE SOUDAGE Fichier technique, wallon de l'Assemblage et du contrôle des matériaux de France www.cewac.be/fr/documents/8-soudage-par-resistance.aspx fichier consulté Oct 2014.
- [23] Soudage par résistance (par point, bossage, molette et en bout), Image cours de soudage Wikipédia: www.afpi-centre-valdeloire.com > ... > Soudure > Soudage par résistance. consulté oct.2014.
- [24] R. CAZES; Soudage par résistance, Technique d'ingénieur Réf : B7720; publié le 10 NOV 1993 ; Article consulté le 10 Aout 2014.
- [25] J. SCHMINCK; Soudage par friction et par ultrason, document en Pdf michel baehrel pages.perso-orange.fr/.../Soudage%20par%20friction%20... TS1 CPI. . Soudage mécanique par friction et par ultrason. Soudage par friction. - Principe. - Avantages. Consulté Aout 2014.
- [26] Ir. Koen Faes ; Techniques d'assemblage mécanique, catalogue Institut Belge de la Soudure (IBS) et Prof. dr. ir. Wim De Waele, Labo Soete, Université de Gand. Consulté Déc 2014.
- [https://www.researchgate.net/..Nombreuses_possibilites_des_techniques_ d'assemblage mécanique.](https://www.researchgate.net/..Nombreuses_possibilites_des_techniques_d'assemblage_mécanique)

- [27] Rouabhi Youcef ; Techniques de soudage, Module de Tp. Université de M'sila - 2018/2019 , consulté Mars 2019
- [29] MOULAY ALI Boujellel ; Etude du comportement des joints soudés par FSW du PEHD: Etude Numérique et Expérimentale, Thèse de magister Université de Mascara Algérie - 2013.
- [30] Olivier Lorrain ; ANALYSES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE FSW, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers , centre de Metz , Paris. France ; Juin 2010.
- [31] Nejah JEMAL ; Qualification du domaine de soudabilité en soudage par friction malaxage Thèse de doctorat, ENSAM Paris, 2011
- [32] Sandra ZIMMER, L. Langlois, J. Layeb, J. C. Goussainb, P. Martina, R. Bigot ; Démarche pour le choix et/ou la conception d'un moyen de soudage par FSW , Article de 19ème Congrès Français de Mécanique à Marseille, du 24 à 28 Août 2009, Ecole Supérieure des Arts et Métiers Tech, Centre de Metz (France) et Institut de Soudure FSW, France ;
- [33] Iñigo TERREROS ; Modélisation DEM thermomécanique d'un milieu continu : Vers la simulation du procédé FSW ; Thèse de doctorat, 2013, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- [34] Sandra ZIMMER ; Le soudage par Friction Malaxage ; Manuel pédagogique –ENSAM-Metz ; Fichier Consulté le 22.07.2104.
www.everdusk.be/uploads/File/misc/mecatro/soudage_friction.pdf:
- [35] FREDERIC Thibeault ; Etude Numérique Et Expérimentale Du Soudage Par Friction Malaxage, Mémoire de maîtrise, Université du Québec, 2012
- [36] Padmanaban, G. and V. Balasubramanian ; Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – An experimental approach , Materials & Design, 2009. 30 (7).
- [37] FARAH Assaf; Comportementen Fatigue De Joints D'aluminium7075-T6 Soudés Par Friction-Malaxage Et Parachevés , Thèse de doctorat Ecole Polytechnique , université de MONTREAL, 2013
- [38] Adeel z., Friction Stir Welding of Polymers: An Overview, chapter from book 2nd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering (pp.19-36), Avril 2017.
- [39] Azarsa E, Mostafapour A (2014) Experimental investigation on flexural behavior of friction stir welded high density polyethylene sheets. J Manuf Process 16(1):149–155

- [40] Bozkurt Y. (2012) The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets. *Mater Des* 35:440–445.
- [41] Inaniwa S. et al (2014) Application of friction stir welding for several plastic materials. In: Proceedings of the 1st international joint symposium on joining and welding, Osaka, Japan, 6–8 November 2013.
- [42] Panneerselvam K., Lenin K. (2014) Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile. *Mater Des* 53:302–307
- [43] Dashatan SH et al (2013) Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets. *Mater Des* 45:135–141
- [44] Eslami S. et al (2015) Effect of friction stir welding parameters with newly developed tool for lap joint of dissimilar polymers. *Procedia Eng* 114:199–207
- [45] Zafar A et al (2016) Investigating friction stir welding on thick nylon 6 plates. *Weld J* 95 (6):210S–218S.
- [46] Paul Kah et coll. ; TECHNIQUES FOR JOINING DISSIMILAR MATERIALS: METALS AND POLYMERS, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 36 (2014) 152-164. 2014
- [47] Anjal R. Patel, Chirag G. Dalwadi, Harikrishna G. Rana, A Review: Dissimilar Material Joining of Metal to Polymer using Friction Stir Welding (FSW) , *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*, Vol 2, N° 10, 2016.
- [48] Santosh K.Sahu, Debasish Mishra, Raju P.Mahto, Friction stir welding of polypropylene sheet, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 21, N° 2, PP 245-254, 2018
- [49] Abdelaziz Timesli, Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 2013
- [50] Thomas Heuzé, Modélisation des couplages fluide/solide dans les procédés d'assemblage à haute température, Thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie - Paris 6, France, 2011.
- [51] Sandra Zimmer-Chevret, Claude Guyomard, Laurent Langlois, Régis Bigot, Patrick Martin, FSW: Un Procédé De Soudage pour Les alliages d'aluminium de fonderie, 11 ème Colloque National AIP PRIMECA La Plagne, Apr 2009, France
- [52] Amevi Tongne ; Etude Expérimentale Et Numérique du Procédé de Soudage FSW (Friction Stir Welding). Analyse Microstructurale et Modélisation Thermomécanique des Conditions de Contact Outil/Matière Transitoires, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint - Etienne, France, 2014.

- [53] Sabrina GASTEBOIS ; Simulation numérique du soudage FSW à l'aide d'une formulation ALE, Thèse de doctorat. École nationale supérieure des mines de Paris- France, 2015.
- [54] Zhi Zhu, Min Wang, Huijie Zhang, Xiao Zhang, Tao Yu and Zhenqiang Wu, A Finite Element Model to Simulate Defect Formation during Friction Stir Welding, *Metals*, 7(7), 256, 2017
- [55] Bahman Meyghani, Mokhtar B. Awang, Seyed Sattar Emamian, Mohd Khalid B. Mohd Nor and Srinivasa Rao Pedapati, A Comparison of Different Finite Element Methods in the Thermal Analysis of Friction Stir Welding (FSW), *Metals*, 7, 450, 2017.
- [56] VipinVijayan, Pashupati Pokharel, Min Kwan Kang, Sunwoong Choi, Thermal and mechanical properties of e-beam irradiated butt-fusion joint in high-density polyethylene pipes, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 122, PP 108-116 (2016).
- [57] Huan Sheng Lai, Seong Hee Kil, Kee Bong Yoon, Effects of defect size on failure of butt fusion welded MDPE pipe under tension; *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(5), PP 1973-1980, 2015.
- [58] Sandra Zimmer ; Contribution a l'industrialisation du soudage par frictionmalaxage,Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité "Mécanique" , paris ,France , décembre 2009.
- [59] Pragma N.Banjare, Pankaj Sahlot, Amit Arora, An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 239, PP 83-91, 2017
- [60] Mirley Moreno-Moreno, Yorledis Macea Romero, Habib Rodríguez Zambrano, Nora Catalina Restrepo-Zapata, Conrado Ramos Moreira Afonso, Jimy Unfried-Silgado, Mechanical and thermal properties of friction-stir welded joints of high density polyethylene using a non-rotational shoulder tool, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.97, Issue 5-8, pp 2489-2499, 2018.
- [61] Haijing Li, Bingjun Gao, Junhua Dong, Yang Fu, Welding effect on crack growth behavior and lifetime assessment of PE pipes, *Polymer Testing*, Vol. 52, PP 24-32, 2016
- [62] Sadegh Hoseinlghab, Seyed Sajad Mirja vadi, Nasser Sadeghian, Iraj Jalili, M. Azarbarmas, Mohammad Kazem Besharati Givi, Influences of welding parameters on the quality and creep properties of friction stir welded polyethylene, *Materials & Design*, Vol. 67, PP 369-378, 2015
- [63] Ebrahim Nateghi, Morteza Hosseinzadeh, Experimental investigation into effect of cooling of traversed weld nugget on quality of high-density polyethylene joints, *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 84, Issue 1–4, pp 581–594, 2016.

[64] Dickerson T., Shi Q., Shercli H.R., ” Heat flow into Friction Stir Welding tools”, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, 2003.

[65] Simar A., Pardoën T., Meester B. ; Influence of Friction Stir Welding parameters on the power input and temperature distribution in aluminium alloys, 5th International Symposium on Friction Stir Welding, 2004.

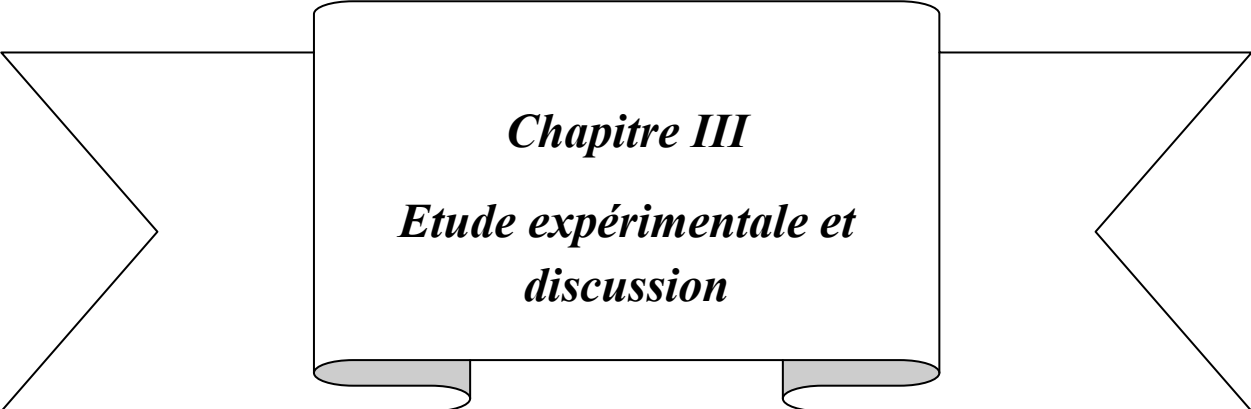
[66] Chao Y.J., Qi X., ; Heat transfert and thermomechanical analysis of friction stir joining of AA6061-T6 plates, 1st International Symposium of friction stir welding, 1999.

[67] Chao Y.J., Qi X., ; Heat transfert and thermomechanical analysis of friction stir joining of AA6061-T6 plates, 1st International Symposium of friction stir welding, 1999.

[68] Chen C., Kovacevic R.; Finite element modelling of thermomechanical performance of Friction Stir Welding, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, 2003.

[69] Feng Z., Gould J.E., Linert J.L.; A heat flow model for Friction Stir Welding of aluminium alloys, The Minerals, Metals & Materials Society, pages 149-158, 1998.

[70] Song M., Kovacevic R.; Thermal modelling of Friction Stir Welding in a moving coordinate system and its validation, Internationnal Journal of Machine Tolls & Manufacture, volume 43, pages 605-615, 2002.



Chapitre III
Etude expérimentale et
discussion

III.1 Introduction

La partie expérimentale de cette thèse a été réalisée en trois étapes, décrites ci-après dans l'ordre chronologique. L'étape 1 (partie 1) concerne le soudage des plaques en PEHD par soudage par FSW utilisant deux configurations géométriques de pion, alors que l'étape 2 (partie 2) concerne la caractérisation expérimentale à travers des essais de traction. Pour l'ensemble de ces travaux, des plaques (d'une épaisseur donnée) d'un PEHD soudées par FSW ont été utilisées pour comprendre le comportement mécanique après soudages et dans la dernière étape (partie 3) des mesures de micro-dureté dans le but de mettre en évidence l'effet du soudage sur les propriétés mécaniques du PEHD.

III.2 Equipements et matériaux :

III.2.1 Préparation des éprouvettes

Le matériau utilisé est un polyéthylène à haute densité (PEHD) utilisée dans la fabrication de tuyaux réservés pour l'adduction et la distribution de l'eau potable (fig.III.2) conforme aux normes algériennes NA7700-2 fabriqué par le groupe CHIALI de Sidi Bel-Abbes [1]. Il s'agit d'un PEHD de masse molaire est de l'ordre de 500 kg/mol. Les températures de transition vitreuse et de fusion sont respectivement de (-125°C et 135°C).

Des plaques dont l'épaisseur est de 4 mm, une largeur de 60 mm et une longueur de 300 mm (fig.III.1) ont été préparé à partir des tubes de diamètre extérieur est de 450 mm et d'épaisseur égale 61.5mm. Les pièces sont usinées au niveau d'hall technologique de Génie mécanique à l'université de Mascara (Algérie), de l'origine de tube de PEHD (PE 100).

Tableau III.1 : propriétés mécaniques de la résine utilisée pour PEHD. [01]

Désignation de la résine	Classification suivant ISO	Contrainte minimale requise (MRS) MPa	Résistance hydrostatique à long terme à 20°C (σ) MPa
PEHD 3 ^{ème} génération	PE 100	10.0	8.0
PEHD 2 ^{ème} génération	PE 80	8.0	6.3
PEHD 1 ^{ère} génération	PE 63	6.3	5.0

Tableau III.2 : caractéristiques mécaniques et physiques du polyéthylène. [01]

Paramètre	Méthode d'essai	PE 80	PE 100	Unité
Caractéristiques physiques				
Masse volumique	EN ISO 1183	949 à 956	956 à 961	Kg/m ³
Indice de fluidité MFI (190°C, 5 kg)	EN ISO 1133	0.7 à 1	0.2 à 0.5	g/10min
Caractéristiques mécaniques				
Module d'élasticité	DIN 53457	≈ 900	≈ 1200	N/mm ²
Charge à la rupture	ISO 6259	≈ 24	≈ 24	N/mm ²
Allongement à la rupture	ISO 6259	> 500	> 500	%
Dureté Shore à 20°C	ISO 868	57	59	-
Résilience IZOD S.I à 23°C	ASTM D 256	> 600	> 600	J/m ²
Caractéristiques thermiques				
Conductibilité thermique à 23°C	DIN 52612	0.40 à 0.45	0.40 à 0.45	W/m.k
Dilatation linéaire	DIN 53752	1.6 à 2* 10 ⁻⁴	1.6 à 2* 10 ⁻⁴	°K ⁻¹
Autres propriétés				
% en poids de noir de carbone	ISO 6964	2.0 à 2.5	2.0 à 2.5	%
Dispersion du noir de carbone	ISO 18553	≤ 3	≤ 3	-
Stabilité à l'oxydation à 200°C	EN 728			min
Coefficient rugosité hydraulique		0.01 jusqu'à DN 200 0.05 pour DN ≥ 200		
Résistivité électrique	DIN 53842	≥ 10 ¹⁷	≥ 10 ¹⁷	Ω/cm

La géométrie des pièces échantillons a soudées (fig.III.2) de forme rectangulaires minces avec l'épaisseur de 4 mm et une longueur de 300 mm et largeur égale à 60 mm, sont coupées par la scie circulaire électrique (fig.III.4), puis usinées sur une fraiseuse universelle type (VHF-2) sur la figure III.3, sont fixées par un support de bridage destiné pour ce type de soudage.

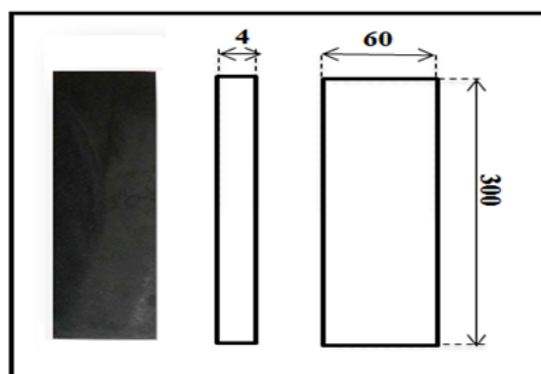


Figure III.1 : la Géométrie des plaques préparées



Figure III.2: Tube en PEHD

Tableau III.3 : Les Résines utilisées pour les tubes PEHD. [1]

Désignation de la résine	Contrainte minimal requise (MPa)	Contrainte hydrostatique à long terme σ (MPa)
PE100	10	8
PE 80	8	6,3

Tableau III.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques du PEHD. [1]

Caractéristiques	Unité	PE80	PE100
Masse volumique (densité)	kg/m ³	949 à 956	956 à 961
Indice de Fluidité MFI (190 °C ;5kg)	g/10mn	0.7 à 1	0.2 à 0.5
Resistance au seuil d'élasticité	MPa	≥15	≥19
Allongement a la rupture	%	>600	>600
Module d'élasticité	MPa	800	1000
Température fragilité	°C	<-100	<-100
Dilatation linéaire	K ⁻¹	24.10 ⁴	24.10 ⁴
Resistance électrique	Ω/cm	≥10 ¹²	≥10 ¹²

**Figure III.4 : Scie circulaire d'atelier****Figure III.3 : Fraiseuse VHF-2**

III.2.2 Opération du Soudage par FSW

a) Outils utilisés en soudage FSW

On a utilisé deux types d'outil de soudage FSW un outil T7 et T9 présenté sur la figure III.5 sont usinés en acier d'usage courant GS 235 (ancienne norme est E36), réalisés préalablement par Mr Bouha [3], d'après une série des outils on a tirer les deux outils réalisable et donne des résultats contents.

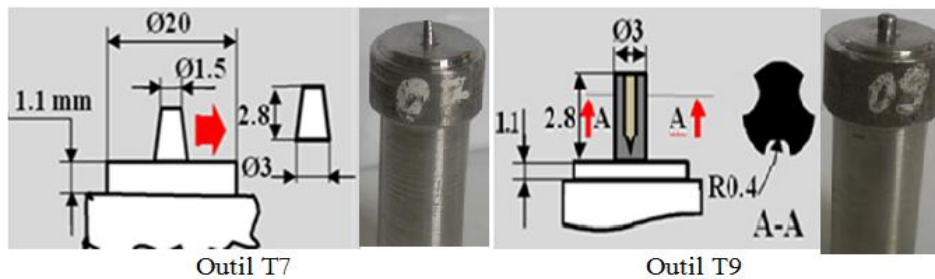


Figure III .5 : présentation des outils utilisés T7 et T9 [3].

b) Paramètres de coupes

* Paramètres utilisés pour soudage des plaques.

Tableau III.5: paramètres de soudage FSW.

Vitesse d'avance outil (mm/min)	Vitesse de rotation Outil (tour/min)	Outil utilisés	Epaisseur de plaques (mm)
24	875	T7 et T9	4
40			

c) Principe de soudage FSW

Les deux pièces à souder sont mises en contact bout a bout et solidement bridées, l'outil tourne et pénètre la matière et se déplace sur le long entre deux pièces en PEHD. Cet outil est composé essentiellement d'un épaulement et d'un pion (selon les choix des formes) le frottement de l'outil sur les pièces provoque un échauffement qui entraîne a ramollis la matière et le pion en rotation plonge dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec les pièces, est ensuite animé d'un mouvement d'avance (fig. III.6) , par l'effet de la d'outil exercée doit être suffisante pour que la chaleur produite par Le frottement entre l'épaulement ,et la déformation de la matière, par la combinaison de deux mouvements

d'avance et de rotation, permettent de réaliser la soudure de bout a bout grâce au malaxage de la matière s'opérant autour du pion.

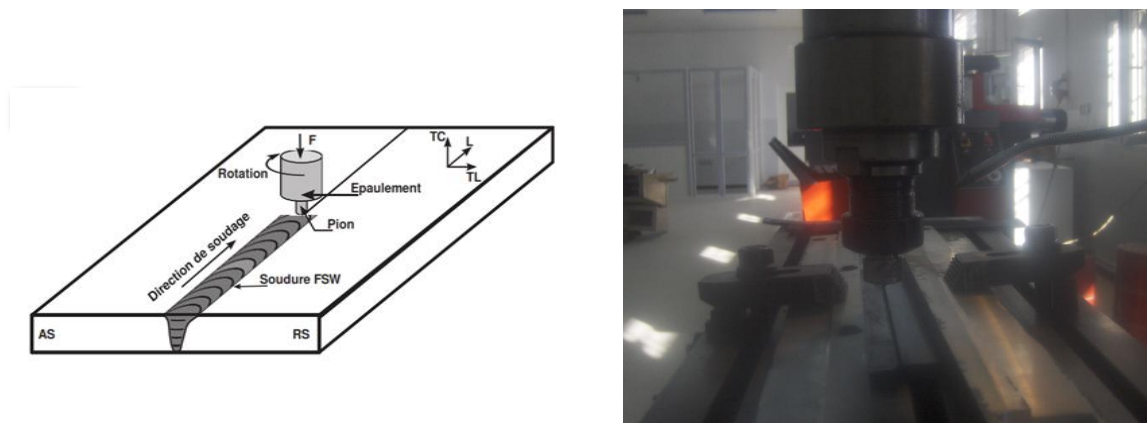


Figure III.6 : l'opération de soudage FSW .

Dans cette partie, on décrit la cinématique du procédé dans toutes les phases de soudage. La figure III.7 suivante est une schématisation simplifiée de la chronologie de ces vitesses au cours du soudage. [02]

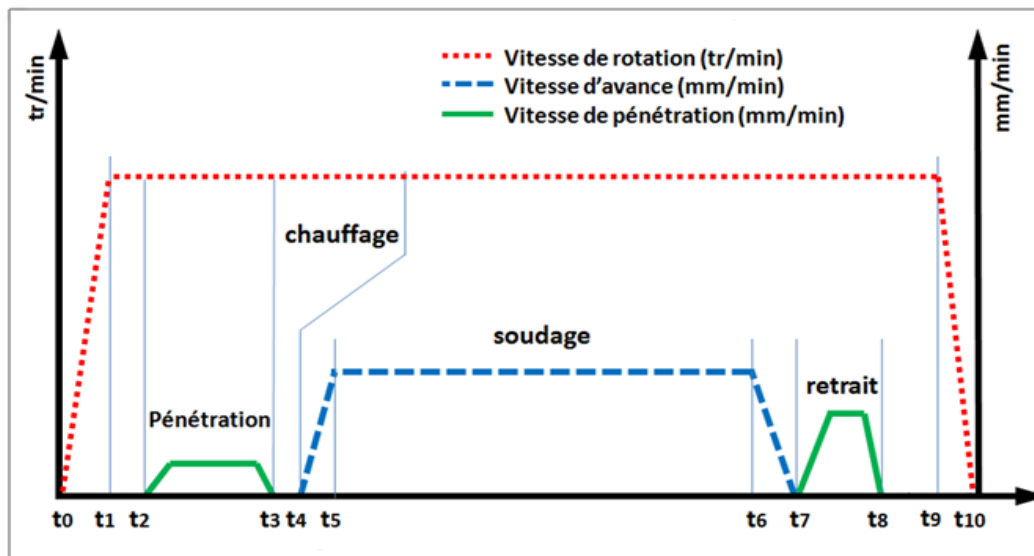


Figure III.7 : cinématique de l'outil FSW dans différentes phase de soudage [02]

$[t_0 t_1]$: est la phase d'accélération nécessaire pour atteindre la consigne de vitesse de rotation.

$[t_2 t_3]$: est la phase de pénétration de l'outil : l'outil en rotation est animé d'une vitesse de pénétration. Cette période se termine une fois la consigne de pénétration atteinte. Cette consigne doit être déterminée pour correspondre à un contact épaulement/pièce ainsi qu'à un effort de forgeage convenable. Cette phase comporte une accélération et une décélération.

$[t_3t_4]$: est la phase de pré- chauffage de la matière (*dwell time*). Cette phase permet de porter la matière autour du pion dans un état compatible pour le début de la soudure.[02]

$[t_4 t_7]$: est la période de soudage. L'outil en rotation est animé d'une vitesse d'avance selon l'axe X_0 . La vitesse de rotation de l'outil peut être différente de celle utilisée dans la phase de pénétration. Dans cette phase, l'outil peut être piloté en effort ou en position. Dans le cas d'un pilotage en effort, l'effort de forgeage appliqué sur l'outil est maintenu au cours de cette phase. Entre la phase dite de « dwell time » et la phase de soudage, on peut passer par plusieurs phases de transition. Une phase de transition en vitesse de rotation, cette transition est généralement négligée et puis que la vitesse de rotation en phase de pénétration peut être égale à celle de la phase de soudage. La deuxième phase de transition est celle de la vitesse d'avance. La troisième transition est le passage de la commande en position z à une commande en effort F_z .

$[t_7t_8]$: l'outil en rotation est retiré de la matière après l'arrêt total de son mouvement d'avance. Après cette phase, la rotation de l'outil peut être arrêtée.[02]

III.1.3. Démarche expérimental

On a exécutés l'opération du soudage sur la fraiseuse universelle (dans le hall technologique de l'université de Mascara), on utilisant les deux types des outils de soudage T7 puis T9 selon les conditions de coupes choisis (N et V_a). l'outil est composé de deux éléments importants sont le pion et l'épaulement, l'outil tourne avec une vitesse de 875 tr/min et pénètre dans la matière, les deux plaques sont jointes cote a cote, le pion pénètre entre les deux pièces premièrement frottant les deux côtés des plaques pour créer un échauffement important (moins de température de fusion) pour ramollisse la matière de deux plaques fixés jusqu'à l'état pâteux, à ce moment-là le rôle de l'épaulement tourne et déplace avec une vitesse d'avance régulière attaque et repousse la matière pâteuse de nouveau par un effort d'appuis pour coller les deux côtés des plaques, la trace de l'épaulement forme un cordon de soudure composé de deux matières malaxés derrière lui grâce à la déformation plastique de la matière composée en PEHD et combinaisons de deux paramètres de coupe : vitesse d'avance et vitesse de rotation d'outil.

Les principaux paramètres du procédé de soudage par FSW sont la vitesse de rotation de l'outil (tr/min), la vitesse de soudage (en mm/min), l'effort de forgeage F appliqué sur l'outil

et la profondeur de pénétration de l’outil dans la pièce (fig.III.6). Les valeurs de ces trois paramètres dépendent des matériaux de base et des épaisseurs des plaques à souder. Elles conditionnent l’état de surface du cordon, sa microstructure et donc ses caractéristiques mécaniques ainsi que la puissance dissipée par frottement et par déformation plastique. Les paramètres les plus importants sont la vitesse de rotation de l’outil (N) et la vitesse d’avance (Va). [04]

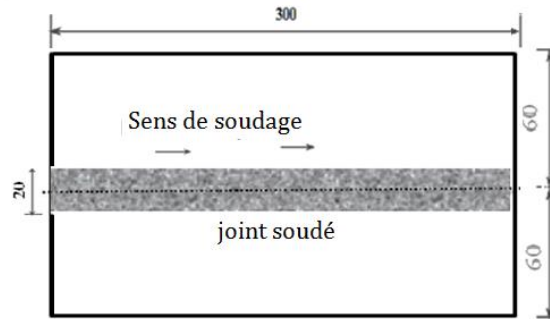


Figure III.8 : cordon de soudage FSW.

Opération du soudage FSW est appliqué sur huit (08) paires des plaques et nous utilisons les deux outils de soudage T7 et T9 au fonction de deux vitesses d’avances choisis sont présenté sur le tableau suivant :

Tableau III.6 : Paramètres et vues des plaques soudées

Paramètres de soudage	Plaque soudée	Vue postérieure
<p>Essai n°1/ Outil T9</p> <p>Vitesse d’avance va=24mm/min</p> <p>Vitesse de rotation N =875tr/min</p>		
<p>Essai n°2/ Outil T9</p> <p>Vitesse d’avance va=24mm/min</p> <p>Vitesse de rotation N =875tr/min</p>		

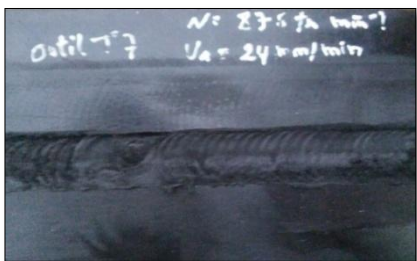





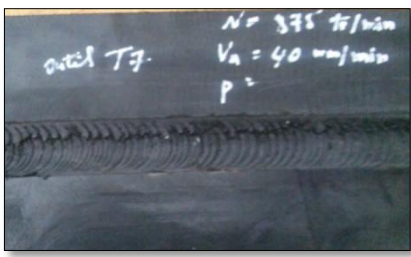


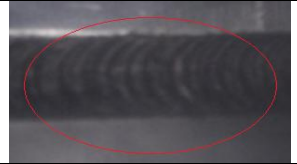


Paramètres de soudage	Plaque soudée	Vue postérieure
<p>Essai n°5/ Outil T7</p> <p>Vitesse d'avance</p> <p>va=24mm/min</p> <p>Vitesse de rotation</p> <p>N =875tr/min</p>		
<p>Essai n°6/ Outil T7</p> <p>Vitesse d'avance</p> <p>va=24mm/min</p> <p>Vitesse de rotation</p> <p>N =875tr/min</p>		
<p>Essai n°7/ Outil T7</p> <p>Vitesse d'avance</p> <p>va= 40mm/min</p> <p>Vitesse de rotation</p> <p>N =875tr/min</p>		
<p>Essai n°8/ Outil T7</p> <p>Vitesse d'avance</p> <p>va= 40mm/min</p> <p>Vitesse de rotation</p> <p>N =875tr/min</p>		

Tableau III.7 : présente les paramètres de processus de soudage pour outils T7 et T9

Type d'outil	Paramètres de processus		Qualité de soudage	Cordon soudé
Pion cylindrique (T7)	Vitesse de rotation N (tr/mn)	vitesse d'avance a(mm/min)		
Test N°				
5	875	24	Soudage correct	
7		40	Cordon régulier	
Type d'outil :	Paramètres de processus		Qualité de soudage	Plaque soudée
Pion conique (T9)	Vitesse de rotation N (rpm)	vitesse d'avance a (mm/min)		
Test N°				
2	875	24	Soudage correct	
4		40	Soudage correct	

A partir du tableau 2, on a choisi les plaques de bonne qualité de soudage pour la vitesse de rotation 875 tr/min puis on passe au préparation des échantillon pour les essais de traction monotone.

III.3 L'essai de Traction

L'essai de traction uni-axial est un moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à une vitesse de chargement, On utilise une machine hydraulique type INSTRÖN 1341 classique (figure III.12). Les essais ont été réalisés à température ambiante (23°C), à trois vitesses comprise 0.01 et

0.1mm/s. Le déplacement de la traverse de la machine nous permet de mesurer directement le déplacement automatique de l'éprouvette au cours de l'essai à l'aide d'un logiciel intégré.

III.3.1. Eprouvette de traction non soudée (éprouvette témoin)

Préparation de d'éprouvette de traction témoin sans soudage pour l'essai de traction, l'échantillon enlevé à partir du tube en PEHD (fig. III.2), plaque mince avant soudage selon la forme Haltère correspond au norme ISO 3167 model B présenté sur la figure III.9.

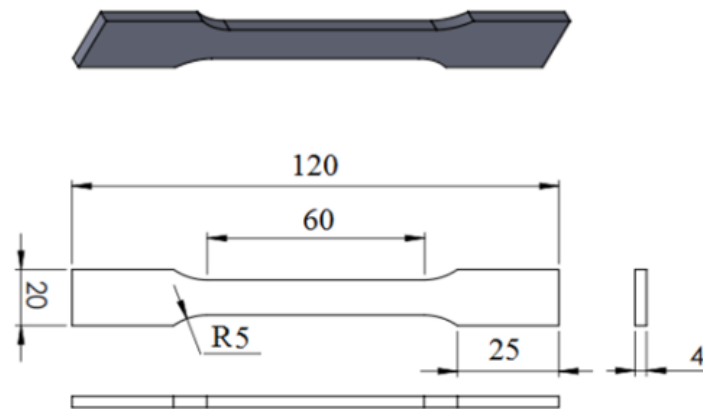


Figure III.9 : Géométries de l'éprouvette de traction non soudée [5]

III.3.2 Eprouvettes de traction soudée

Les éprouvettes de traction (fig.III.10) ont été prélevées à partir des plaques soudées perpendiculairement au cordon de soudure de type Haltère correspond au model B de la norme ISO [5]. Avec l'épaisseur de 4 mm, la largeur b_2 est de 20 mm, et la longueur de la zone utile théorique L_0 est de 40 mm.

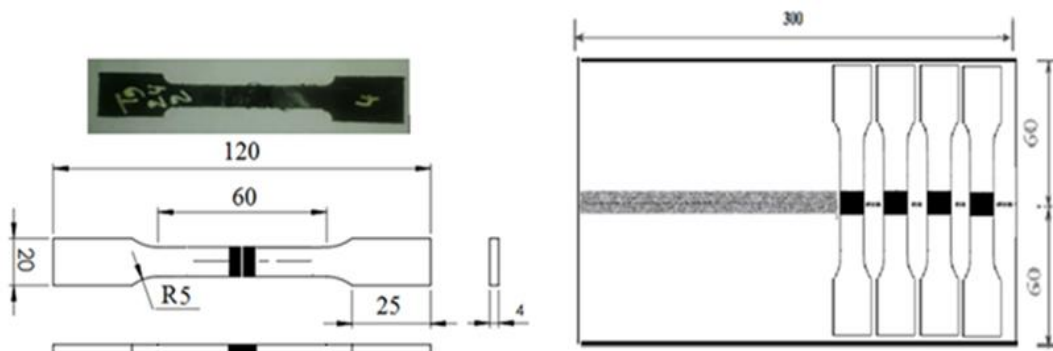


Figure III.10 : Géométries des éprouvettes de traction après Soudage FSW.

III.3.3 L'essai de vidéo traction

Dans cette essai, le banc de traction est couplé au système vidéo-métrique « vidéo-traction », développé à l'Ecole des Mines de Nancy au laboratoire de physique du solide par l'équipe du Professeur G'SELL. Il repose sur la mesure précise de la géométrie locale d'une éprouvette « sablier » au cours de la déformation. Cela est rendu possible grâce à une caméra vidéo reliée à un micro-ordinateur doté d'un système d'analyse d'images (Figure. III.12). [6]

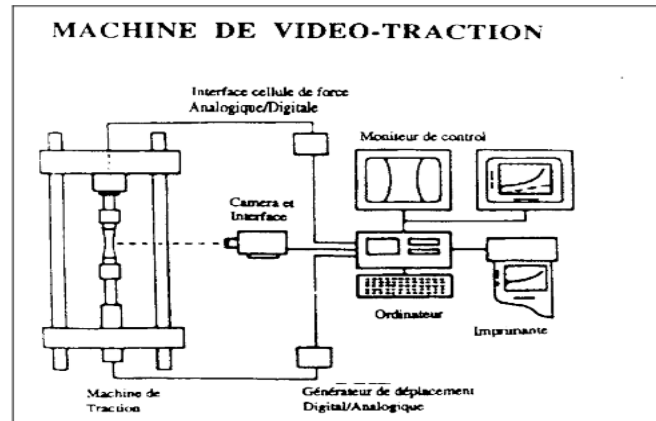


Figure III.11 : Schéma du principe de fonctionnement du système « vidéo-traction ». [6]

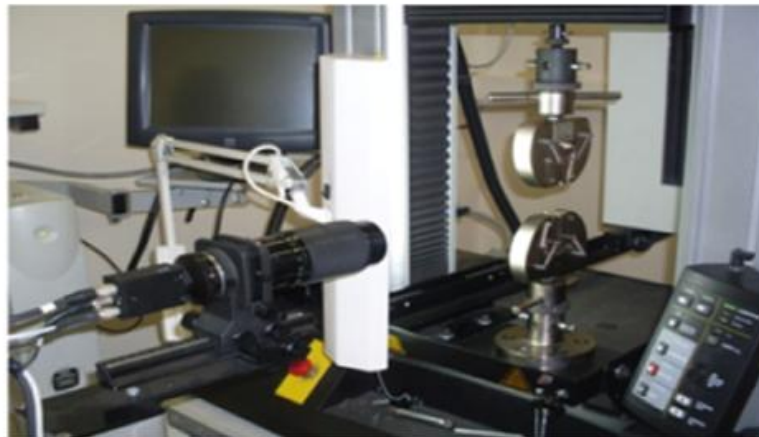


Figure III. 12: Schéma du principe du système « vidéo traction ». [6]

III.3.4 Loi de comportement du PEHD

Les différentes propriétés élasto-plastiques du matériau de base PEHD sans soudage (éprouvette témoin non soudée) peuvent être tirées des courbes contraintes-déformations représentées sur la figure III.13 ; Les courbes montrent respectivement le comportement

fréquent à température ambiante et sous sollicitation uni-axiale lente d'un polymère semi-cristallin qui passant par les trois étapes suivantes:

- **Étape I** : Le début de la courbe présente une pente élevée quasi-linéaire à l'origine. Cette partie est appelée réponse viscoélastique, et l'adoucissement presque absent pour lesquels la limite élastique présente une transition arrondie progressive.
- **Étape II** : La déformation devient irréversible. La striction se développe. Cette étape est associée en partie au déroulement des macromolécules sous l'effet de la déformation appliquée. La striction se stabilise et le diamètre minimal de l'éprouvette ne diminue quasiment plus. Les épaules de striction se propagent alors vers les extrémités de l'éprouvette. Cette propagation se traduit par une faible variation de la force.
- **Étape III** : Ce stade, qualifié de début de durcissement structural est vraisemblablement lié à l'orientation des chaînes selon la direction principale de déformation.

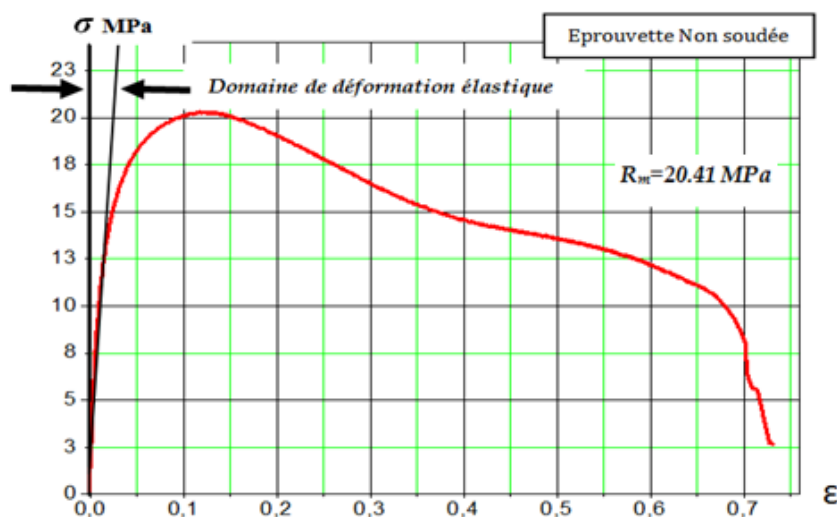


Figure III. 13: Courbes contrainte-déformation d'éprouvette Non soudée (Éprouvette témoin).

III.3.5 Résultats et Discussions

Après le contrôle visuel, on a réalisé l'expérience avec succès sur des plaques en PEHD par l'ensemble de paramètres sélectionné ($N=875\text{tr/mn}$, $a=24$ et 40mm/mn)., l'examen visuel d'échantillons soudés par les deux types d'outils T7 et T9 qui présente 4 éprouvettes de bons résultats et les autres sont des mauvaises qualité du cordon de soudage, les résultats sont comparés avec celle d'éprouvette témoin non soudée (ETNS) qui sont très satisfaisants

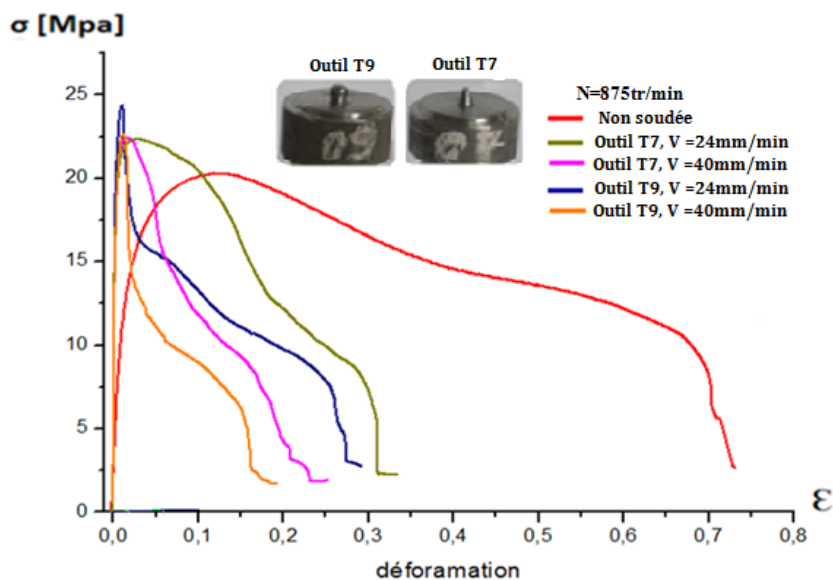


Figure III. 14: résultats de traction des éprouvettes soudées

III.3.6 Apparence de l'échantillon soudé

L'expérience a été réalisée avec succès sur des plaques en PEHD l'ensemble de paramètres sélectionné, La figure (III.13) présente un aspect typique de la soudure sur des plaques soudées (vitesse de rotation 875 tr/min, vitesse d'avance 24 et 40 mm / min présenté sur le tableau 2 et 3, L'examen visuel d'échantillons soudés par les deux types d'outils qui présente 4 éprouvettes de bons résultats et les autres sont des mauvaises qualité de soudage, les échantillons relatives a des paramètres de soudage des outils T7 et T9 a une vitesse de rotation de 875 rpm dans le cas de 24 et 40mm/mn présentent un aspect satisfaisant, et pour les autres paramètres sont des mauvaises qualité on observe des fissures du côté en retrait qui montre un manque de liaison et un malaxage de matériaux inapproprié, avec l'augmentation de la vitesse de rotation, les vides sont réduits, La formation de cavités du et des défauts remarquables, la zone de malaxage de l'échantillon soudé avec un pion cylindrique avait un bon état de surface, ce qui prouve l'efficacité de l'outil pour malaxer le matériau polymère ramolli, lors de l'augmentation de la vitesse de rotation, la chaleur de friction augmentait, a des vitesses de soudage élevées, le matériau surchauffe a une vitesse de rotation plus élevée, la chaleur est générée, ce qui déforme le matériau; et à ce stade, avec une vitesse de soudage élevée, lorsque l'outil passe sur le joint, il pèle le matériau sur ses bords, Le défaut de pelage a également été observé dans d'autres travaux de recherche .

III.3.6.1 Effet des paramètres de processus :

On remarquons une amélioration importante par l'effet de la température de soudage qui apparaissent au début de traction sur la zone élastique (figure.III.13) , l'augmentation de contrainte maximale $R_m = 24.3$ MPa en d'autre terme on une amélioration du module d'élasticité a comparé a celle d'éprouvette témoin non soudée (ETNS) présentée sur la figure (III.12) qui étaient de valeur $R_m = 20.41$ MPa, en même temps on a des mauvais résultats ou nous avons un abaissement de la valeur dans la partie plastique des courbes c-a d que on a perdu la plasticité du matériau (Zone plastique sur la courbe de traction), la zone soudée est devenue rigide, ce phénomène causé par plusieurs paramètres liés au soudage FSW et le matériau lui même et d'autres paramètres. Dans ce cas on peut constater que Le soudage FSW affecte te la zone soudée et influe sur le cordon soudé par importance de changement du comportement mécanique du matériau soudé.

Tableau III.8 : représente les valeurs de résistance à la traction et leur efficacité sur le cordon soudé

Outil a Profil conique (T7)	Vitesse de rotation (tr/mn)	vitesse d'avance a (mm/min)	Contrainte max de traction R max (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Taux d'efficacité du module de Young du joint soudé (%)	Taux d'efficacité de contrainte du joint soudé (%)
Test 1	875	24	22,6	1320	43.47	5,56
Test 2		40	23,11	2102	128.47	7,94
Outil a Profil cylindrique (T9)						
Test 3	875	24	24,61	1500	63	14,94
Test 4		40	22,71	1433	55.76	6,07
Eprouvette non soudée (ETNS)			21,41	920	///////	///////

Enfin en peut dire que les deux outils choisis donnent des résultats parfaits sur le matériau PEHD par l'effet du soudage FSW.

III. 4. Essai de la micro-dureté

Le but principal de l'essai de la dureté est d'évaluer la contrainte de la soudure particulière la dureté de toute zone affectée thermiquement par l'effet d'outil (ZAT) et zone noyau(ZN). La dureté dans et autour de ces zones peut aider à évaluer la fragilité d'une soudure en fonction du matériau de base, et donc si la soudure présente la résistance voulue.

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un corps plus dur. Il s'agit des essais les plus couramment pratiqués, un pénétrateur indéformable laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté. [7]

III.4.1. Principe de la dureté Vickers :

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées. [8]

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

HV = Dureté Vickers.

F = Force appliquée [N]

d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

g = Accélération terrestre. [m.s^{-2}] (9.80665).

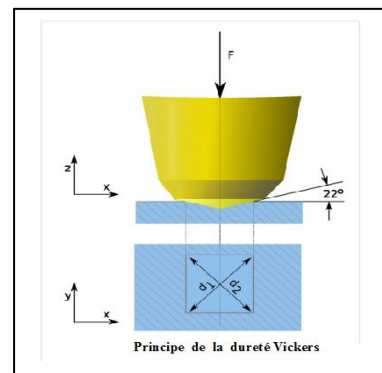
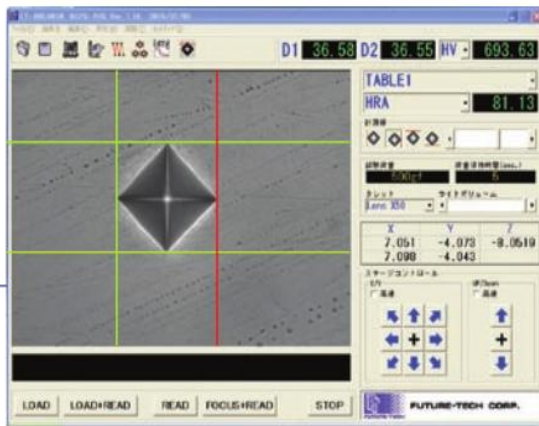


Figure III.15 : Principe de la dureté Vickers [8].

III.4.2 Appareil utilisée en dureté (HV) :

L'appareil utilisée est un testeur de dureté automatique destiné pour les mesures de dureté des matériaux, type FV-ARS 9000 de laboratoire de sciences des matériaux de l'université de Mascara (Figure III.15) équipé d'une caméra optique couplée par un logiciel de traitement de données plus avancé avec divers format de sortie de données et traitement statistique (graphes, diagrammes) [9].



▲Mirror Surface



FM-ARS 9000

Figure III.16: Testeur de micro-dureté type FV-ARS 9000. [9]

III.4.3 Mode opératoire

III.4.3.1 Préparation des échantillons :

Les échantillons préparés sont enlevés des plaques soudées par FSW sur une largeur de 10 mm et de même l'épaisseur des plaques soudées ($e = 4\text{mm}$) sont préparés comme suit :

1. Coupés par une scie circulaire ;
2. Polir la surface sur une polisseuse ;
3. Nettoyage des surfaces à traitée.

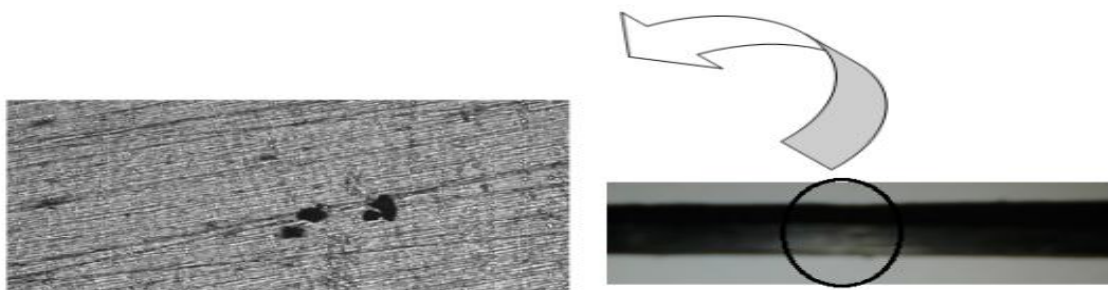


Figure III.17: Vue microscopique Sous Caméra testeur.

III.4.3.2 Test de micro dureté Vickers

L'empreinte de la micro-dureté Vickers (HV) sur la figure.III.18 effectuées sur le mi-épaisseur de deux plaques soudées (coté latérale) du cordon soudé (fig.III.16) avec un espacement de 1 mm, dans un intervalle de (-15 à +15 mm) du centre de soudure , dans ce cas on s'intéresse à la mesure de toutes les 4 principaux zones thermiques, on note la zone noyau, la zone affectée thermo mécaniquement (ZATM), la zone affectée thermiquement (ZAT) et le matériau de base qui n'est pas affecté par le procédé.

Une série de mesures spécifiques sont mesurés sur même l'axe ($x=1, y=0$) sur le mi-épaisseur des échantillons. La charge appliquée est 500 gf pendant 10 secondes de pénétration à température ambiante 23C°.

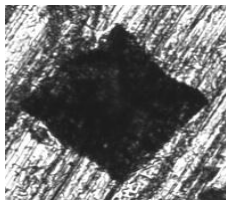


Figure III.19: empreinte pyramide Vickers



Figure III.18 : profil du joint soudé

Les propriétés mécaniques obtenues sont différentes à partir des zones qui constituent les joints soudés par FSW, le profil de micro-dureté présente une augmentation importante qui atteint une valeur maximale au zone de noyau (ou (NZ) Nugget Zone) qui est la zone équi-axes est plus dure par rapport aux autres zones , et par contre, la micro-dureté diminue peu à peu vers la zone moins dure c'est la zone du matériau de base qui représente l'état normal du matériau non soudé (matériau témoin non soudé) cette zone située hors la déformation thermique au cours du soudage, dont elle garde sa structure initiale granulaire sans changement.

La dureté au zone noyau est la plus dure que les autres zones (figure III.19), puis elle se dégrade lorsque s'éloigne de la zone noyau passant par les autres zones, du centre jusqu'à le matériau de base (MB), ce phénomène d'augmentation de la dureté causé principalement par l'effet du pion de l'outil qui chauffe le milieu d'attaque de deux plaques pour créer une matière pâteuse visqueuse au centre qui change sa structure granulaire ,autant qu'il ya un phénomène de laminage sur la zone ramollie, qui induit des déformations plastiques importantes, ce qui aurait tendance à durcir le matériau et augmente la plasticité de la zone laminée et le matériau devient Rigide c'est le changement du comportement de la zone attaquée par l'outil.

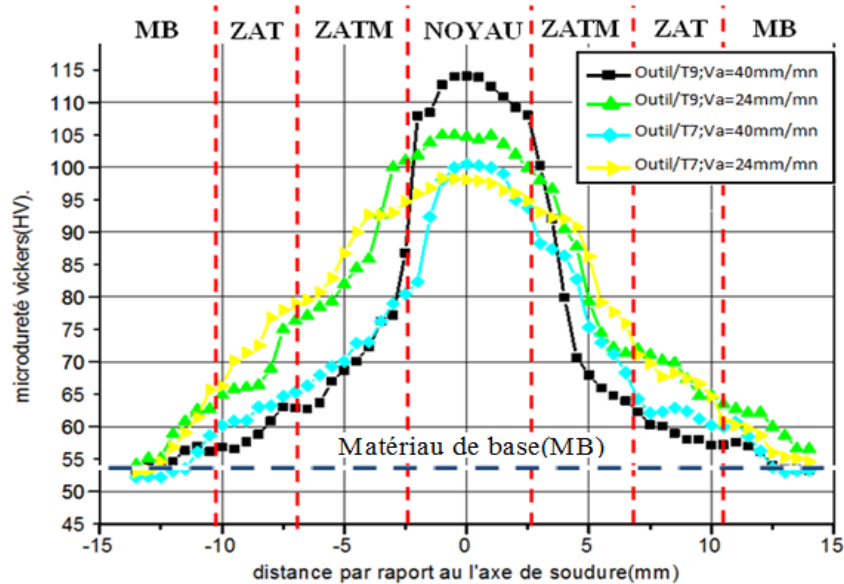


Figure.III.20: Variation de micro-dureté Vickers HV

Selon Z. Chen et D.H. Jeong [10,11] et all, la valeur de dureté dans la NZ devrait être plus élevée que les autres zones en raison de sa structure, la répartition typique de la micro-dureté dans les zones sont presque symétrique par rapport à la ligne médiane de soudure parce que le champ d'écoulement plastique dans les deux côtés du centre de soudure est uniforme. [10,12].

III. 5 CONCLUSIONS

La caractérisation du comportement mécanique des matériaux à travers les différents tests effectués, les résultats obtenus montrent la relation complexe entre matériau et l'outil qui contribue au changement physico-chimique modifié par plusieurs paramètres de soudage tels que la vitesse d'avancement, la vitesse de rotation et la géométrie de l'outil.

Dans Cette étude, nous avons conclu que le comportement du joint soudé FSW dépend fortement de la géométrie de l'outil, et les paramètres choisis, l'union de tous ces paramètres prouve que le soudage FSW du HDPE donne des résultats très satisfaisants et très important.

Selon les résultats obtenus on observe que meilleures résultats obtenus par l'outil T7 a profil conique a obtenant un maximum de l'efficacité de la soudure de 128.47%, le taux d'amélioration du module d'élasticité pour la vitesse de 40 mm/min et 43.47 pour 24mm/min, au moment que amélioration en terme de taux d'efficacité de contrainte max est 14.94% pour outil T9 a vitesse de 24 mm/min,

Les bons résultats donnés à l'outil de profil conique avec un rapport volume dynamique produit de meilleurs résultats que le profil cylindrique sont adaptés pour obtenir une bonne qualité de soudage des matériaux thermoplastiques tels que le PEHD.

Enfin ce travail constitue un véritable défi expérimental. Pour ce faire, nous avons développé une technique de soudage du PEHD. En ce qui concerne l'influence de la géométrie de l'outil sur le soudage FSW, l'outil T7 convient à l'obtention d'une bonne qualité de soudage pour les matériaux thermoplastiques tels que le PEHD.

Bibliographie

- [1] Catalogue technique pour tubes en polyéthylène PE Filiale du Groupe CHIALI de Sidi Bel-Abbes ; site : www.groupe-chiali.com. Consulté Aout 2015.
- [2] Nejah JEMAL, Qualification du domaine de soudabilité en soudage par friction malaxage, Thèse de doctorat, ENSAM, Paris, 2011.
- [3] BOUHA Djilali, Influence de la géométrie de l'outil sur le soudage par friction malaxage (FSW) d'un PEHD, Thèse de magistère en Génie Mécanique, Université de Mascara, 2013.
- [4] Younes DEMMOUCHE, Etude du comportement en fatigue d'assemblages soudés par FSW pour applications aéronautiques, thèse de doctorat Université de Bordeaux 2012.
- [5] Dimensions des éprouvettes pour essais de traction selon les normes : ASTM (norme ISO 3167) pour Thermoplastiques et Thermodurcis, site: http://www.atomer.fr/1/1_dimensions-eprouvettes-essais-de-traction.html
- [6] Yannick Tillier, Identification par analyse inverse du comportement mécanique des polymères solides : applications aux sollicitations multiaxiales et rapides, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France 1998.
- [7] Dureté (matériau) Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73044167>. Consultation du janvier 2018.
- [8] Norme Européenne pour la dureté Vickers: EN ISO 6507-1 - Essai de dureté Vickers et Méthode d'essai. ; Consultation du janvier 2018.
- [9] Catalogue testeur de dureté automatique : Hardness tester | FULLY-AUTOMATIC MICRO/VICKERS HARDNESS ...FV-ARS 9000 : www.ft-hardness.com
- [10] Zhitong Chen, Shengxi Li, Lloyd H. Hihara « Microstructure, mechanical properties and corrosion of friction stir welded 6061 Aluminum Alloy » , Hawaii Corrosion Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI 96822, USA.
- [11] D.H. Jeong, U. Erb, K.T. Aust, G. Palumbo, The relationship between hardness and abrasive wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-P coatings, Scripta Materialia, 48(8):1067-1072, 2003.
- [12] W. Xu, J. Liu, G. Luan, C. Dong, Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints in 2219-T6 aluminum alloy, Materials & Design, 30 (2009) 3460-3467.

Conclusion générale et perspectives

La caractérisation du comportement mécanique des matériaux à travers les différents tests effectués, les résultats obtenus montrent la relation complexe entre matériau et l'outil qui contribue au changement physico-chimique modifié par plusieurs paramètres de soudage tels que la vitesse d'avancement, la vitesse de rotation et la géométrie de l'outil. Dans Cette étude, nous avons conclu que le comportement du joint soudé FSW dépend fortement de la géométrie de l'outil, et les paramètres choisis, l'union de tous ces paramètres prouve que le soudage FSW du HDPE donne des résultats très satisfaisants et très important.

Selon les résultats obtenus on observe que meilleures résultats obtenus par l'outil T7 a profil conique a obtenant un maximum de l'efficacité de la soudure et le taux d'amélioration du module d'élasticité pour la vitesse de 40mm/min et 43.47 pour 24mm/min, au moment que amélioration en terme de taux d'efficacité de contrainte max est 14.94% pour outil T9 a vitesse de 24mm/min,

Les bons résultats donnés à l'outil de profil conique avec un rapport volume dynamique produit de meilleurs résultats que le profil cylindrique sont adaptés pour obtenir une bonne qualité de soudage des matériaux thermoplastiques tels que le PEHD.

Résultats expérimentales comparés avec les autres résultats de modélisation sans presque identiques, ces défaillances peut être du d'un coté au précision de maillage des éprouvettes étudiés et d'autre part du au milieu de des expérience c-d-dire la température du milieu pendant soit les opérations des soudage soit milieu de traction uni axial surtout sont des milieux déférent totalement (laboratoires des essais)

Enfin ce travail constitue un véritable défi expérimental. Pour ce faire, nous avons développé une technique de soudage du PEHD. En ce qui concerne l'influence de la géométrie de l'outil sur le soudage FSW, l'outil T7 convient à l'obtention d'une bonne qualité de soudage pour les matériaux thermoplastiques tels que le PE.

Lors l'opération de soudage, l'apparence des défauts tunnel est apparue sur le cordon après le passage de l'outil de soudage.

Il ne survient que après l'échauffement de l'outil, ce phénomène du au frottement de l'outil sur le matériau lorsque l'opération de soudage dure longtemps qui influas directement sur la qualité de soudage

Il serait donc intéressant d'étudier ces types de phénomènes physiques génèrent ce défaut et comment travailler sur les phases de temps de maintien et d'accélération pour stopper sa formation entièrement.

Au vu de ces constatations, il apparaît intéressant d'essayer de construire une étude analytique et paramétrique, de type plan d'expérience, sur l'ensemble des étapes de l'opération de soudage en se restreignant aux principaux paramètres.