

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières	1
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux	9
Nomenclature.....	10

Introduction générale.....12

Chapitre.1

Méthodes de soudage des tubes en polyéthylène : Etude Bibliographique

1.1 Introduction	17
1.2 Méthodes de soudage des tubes en polyéthylène par fusion	17
1.2.1 Le procédé de soudage bout à bout (Butt fusion joint)	18
1.2.1.1 Description générale	18
1.2.1.2 Déroulement d'un cycle de soudage bout à bout.....	19
1.2.1.3 Equipement de soudage bout à bout	20
1.2.2 Le procédé de soudage par électro-fusion (Electro-fusion joint)	21
1.2.2.1 Description générale	21
1.2.2.2 Déroulement d'un cycle de soudage par électro-fusion	22
1.2.2.3 Equipement de soudage par électro-fusion.....	23
1.2.3 Le procédé de soudage par fusion à souquette (Socket fusion)	23
1.2.3.1 Description générale	23
1.2.3.2 Déroulement d'un cycle de fusion à socquette	24
1.2.3.3 Equipement de soudage par fusion à socquette	24
1.2.4 Le procédé de soudage par fusion à selle (saddle fusion)	20
1.2.3.1 Description générale	25
1.2.3.2 Déroulement d'un cycle de fusion à selle.....	25
1.2.3.3 Equipement de soudage par fusion à selle.....	26
1.3 Etude mécanique et microstructurale des joints de soudure	27
1.3.1 Hétérogénéité de la structure de la soudure	27
1.3.2 Micro et Nano-indentation	27

1.3.3 Délimitation de la zone affectée thermiquement (HAZ)	28
1.3.4 Effets des conditions de soudage	29
1.3.5 Soudage des résines différentes	30
1.3.6 Comparaison des propriétés mécaniques du soudage bout à bout et par électrofusion	31
1.3.7 Effet des environnements agressif sur les propriétés mécaniques des tubes en HDPE	32
1.4 Contrôle qualité du joint de soudure	33
1.4.1 Contrôle non destructif (CND).....	33
1.4.1.1 Contrôle visuel	33
1.4.1.2 Contrôle par ultrason.....	34
1.4.1.3 Contrôle par Micro-onde.....	36
1.4.2 Contrôle destructif (CD).....	36
1.5 Méthodes expérimentale et numérique du soudage bout à bout	37
1.5.1 Mesure expérimentale de température	37
1.5.2 Simulation thermique	38

Chapitre.2

Matériaux et matériels d'expérimentation

2.1 Introduction	44
2.2 Matériaux	44
2.3 Soudage par fusion b-à-b	45
2.3.1 Description de l'appareil d'essais.....	42
2.3.2 Conditions de soudage b-à-b	46
2.4 Usinage des tubes	46
2.4.1 Conditions d'usinage	44
2.5 Préparation des éprouvettes d'essais	47
2.5.1 Eprouvette standard	47
2.5.2 Échantillon pour le DSC	48
2.6 Essais de traction	49
2.6.1 Description	49
2.6.2 Protocole d'essais	49
2.7 Essais de DSC	49
2.7.1 Description de la technique	49
2.7.2 Protocole d'essais	50
2.8 Essais de micro-dureté.....	51
2.8.1 Description	51
2.8.2 Protocole d'essais	51
2.9 Microscopie à balayage électronique MEB.....	52

Chapitre.3

Modélisation et simulation thermique du soudage bout à bout des tubes en HDPE

3.1 Introduction au transfert thermique	55
3.2 Modèle thermique	55
3.2.1 Mise en équations	55
3.2.2 Condition initiale	56
3.2.3 Condition aux limites	56
3.2.3.1 Phase d'égalisation et de chauffage.....	56
3.2.2.2 Phase de retrait de la plaque	57
3.2.2.3 Phase de soudage et de refroidissement	57
3.3 Discrétisation par la méthode de la direction alternée implicite « ADI »	57
3.4 Résultats et discussion	60
3.4.1 Champs de température dans la direction radiale.....	60
3.4.2 Champs de température dans la direction axiale	61
3.4.3 Evolution de la température dans le temps	62
3.4.4 Visualisation du champ de température en 3D	63
3.5 Validation des résultats	64

Chapitre.4 Développement de la méthode d'accès aux couches du tube

4.1 Introduction	66
4.2 La raison : pourquoi cette méthode ?	66
4.3 Norme et dimension.....	67
4.4 Présentation de la méthode.....	69
4.4.1 Phase de préparation des tubes	69
4.4.2 Phase de soudage b-à-b.....	69
4.4.3 Phase d'usinage	70
4.4.4 Phase de préparation et découpage des éprouvettes d'essais.....	71
4.4.5 Phase d'essais mécaniques	72

Chapitre.5

Analyse des propriétés dimensionnelles et structurales

5.1 Introduction	75
5.2 Analyse dimensionnelle : Mesure des bourrelets de soudure interne et externe	75
5.3 Analyse enthalpique différentielle	77
5.3.1 Température de fusion	77
5.3.2 Taux de cristallinité	77

5.4 Mesure de Micro-dureté	82
5.4 Analyse Microscopique des surfaces de rupture.....	84
Chapitre.6	
Analyse de l'évolution des propriétés mécaniques	
6.1 Introduction	87
6.2 Etude du comportement mécanique du matériau de base en HDPE	87
6.3 Etude du comportement mécanique du joint soudé en HDPE	89
6.4 Comparaison des comportements du matériau soudés et non soudés	92
6.5 Évolution des propriétés mécaniques	94
Conclusion générale	99
Références bibliographiques.....	101
Annexes.....	108
Annexe 1: Mode opératoire du soudage par électrofusion	109
Annexe 2: Mode opératoire du soudage bout à bout	110
Annexe 3: Présentation générale de la méthode de la direction alternée implicit « ADI »	111
Annexe 4: Récapitulatif de la distribution de la température dans les quatre phases du soudage bout à bout pour différent nœuds.....	113

Liste des figures

Figure 1.1 Méthode de soudage des tubes par fusion.....	18
Figure 1.2 Diagramme temps – pression – température	20
Figure 1.3 Equipements du soudage bout à bout.....	20
Figure 1.4 Schéma représentatif d'un raccord EF avec deux zones de fusion reliés électriquement ...	21
Figure 1.5 Equipement de soudage par électro-fusion	23
Figure 1.6 Schéma représentatif du soudage par fusion à socquette (socket fusion)	24
Figure 1.7 Equipement par fusion à socquette	25
Figure 1.8 Schéma représentatif du soudage par fusion à selle (saddle fusion)	25
Figure 1.9 Equipement de soudage par fusion à selle	26
Figure 1.10 Microstructures d'une soudure bout à bout du tube en HDPE	27
Figure 1.11 Emplacement d'une grille d'indentation au centre du cordon de soudure	28
Figure 1.12 Schéma représentatif du MZ et HAZ dans une soudure b-à-b	28
Figure 1.13 Forme du bourrelet de soudure en fonction des conditions de soudage (Temps, Pression, Températures)	29
Figure 1.14 Profils de température en fonction des conditions de soudage	30
Figure 1.15 Soudure b-à-b des deux résines PE80/PE100	30
Figure 1.16 Comparaison des courbes (contrainte-déformation) du tube non soudé avec du tube soudé b-à-b et par électrofusion	31
Figure 1.17 Courbes contrainte-déformation de la résine du tube en HDPE exposé dans diverses solutions (mélange de toluène-méthanol, H ₂ SO ₄ , Eau distillée).....	32
Figure 1.18 Procédure de contrôle visuel du bourrelet de soudure sur chantier	34
Figure 1.19 Dimensions et forme du cordon de soudure normalisé	34
Figure 1.20 Technique de contrôle par ultrason	35
Figure 1.21 CND par les techniques des ultrasons angulaires	35
Figure 1.22 Technique de CND par Micro-onde	36
Figure 1.23 Protocole expérimentale de mesure de la température dans le soudage b-à-b	37
Figure 1.24 Evolution de la température dans le soudage b-à-b de l'interface du tube au cours du temps à différentes positions.....	38
Figure 1.25 Allure du maillage du tube après 3s dans la phase d'égalisation	39
Figure 1.26 Allure simplifiée de l'écoulement au niveau de la soudure.	39
Figure 1.27 Evolution de la température expérimentale et numérique de la phase de retrait de la plaque chauffante au centre de la paroi du tube [44].	40
Figure 1.28 Evolution de la température à l'interface miroir/tube mesuré et calculé durant les phases d'égalisation et de chauffage	40
Figure. 1.29 Distribution de température a) direction axiale, b) direction radiale [48].....	41
Figure 1.30 Evolution de température mesuré et simulé	42

Figure. 2.1 Opération de soudage b-à-b sur chantier	45
figure. 2.2 Opération d'usinage des enveloppes soudés et non soudés.....	47
Figure. 2.3 Etape de Préparation des éprouvettes normalisés	48
Figure. 2.4 Schéma des plans de prélèvement des échantillons de DSC.....	48
Figure. 2.5 Machine d'essais de traction piloté par ordinateur et les éprouvettes testé.....	49
Figure. 2.6 Thermo-gramme DSC.....	50
Figure. 2.7 Instrument de Mesure de DSC TA instrument.....	50
Figure. 2.8 Principe d'indentation Micro-Vickers.....	51
Figure. 2.9 Appareil de Micro-dureté.....	52
Figure. 2.10 Microscopie à ballayage électronique MEB	52
Figure. 2.11 Préparation des échantillons (fixation des tissus, nettoyage).....	53
Figure. 3.1 : Présentation en 2.D des tubes à souder avec la plaque chauffante	55
Figure. 3.2 Schéma numérique « ADI ».....	58
Figure. 3.3 Champs de température dans l'épaisseur radiale du tube $T=f(e)$ pour une profondeur ($z=1\text{mm}$) de la plaque chauffante pour les 4 phases.....	60
Figure. 3.4 Champs de température suivant la longueur $T=f(z)$ a une distance du centre de l'épaisseur $r_i+(r_e-r_i/2)$ pour les quatre phases	61
Figure. 3.5 Evolution de la température dans le temps à une distance de 1 mm au centre de la paroi par rapport à l'interface de contact des deux tubes pour les quatre phases	62
Figure. 3.6 Visualisation du champ de température en 3-D, $T=f (r, z)$ pour la fin de chaque phase : a) égalisation, b) chauffage, c) retrais de la plaque et d) soudage et refroidissement)	63
Figure. 3.7 Validation du modèle à partir du résultat obtenu par FEA-Abaqus de Shaheer et all.	64
Figure. 3.8 Validation du modèle à partir du résultat expérimental de M.O. HEHN	64
Figure 4.1 Coupe longitudinale d'une soudure b-à-b le long de l'épaisseur du tube	66
Figure 4.2 Echantillon d'essai standard type IV en tant que solution pour la fabrication de trois échantillons identiques (CI, CM et CE) extraits de l'épaisseur du tube.....	67
Figure 4.3 Processus de la méthode d'évaluation des propriétés mécaniques et ses phases de fabrication.....	68
Figure 4.4 Vues proches de bourrelets de matière fondu dans 3 différentes soudures montrant quelques variances admises (a), (b) et (c).....	70
Figure 4.5 Schéma de la soudure à travers la paroi du tube en HDPE	70
Figure 4.6 Découage des éprouvettes de traction dans les trois couches	71
Figure 5.1 Dimension des cordons de soudure.....	75
Figure. 5.2 Largeur mesuré des trois cordons de soudure (l) en fonction de la direction circonférentielle du tube	76
Figure. 5.3 Hauteur mesuré des trois cordons de soudure (h) en fonction de la direction circonférentielle du tube	77
Figure. 5.4 Thermogramme de fusion des échantillons non soudées à travers la paroi.....	78
Figure. 5.5 Thermogramme de fusion des échantillons soudées à travers la paroi	78

Figure. 5.6 Evolution de la cristallinité pour les tube soudé et non soudé en fonction de la position de la paroi	82
Figure. 5.7 Evolution de Micro-dureté pour différentes positions à travers la paroi du tube soudé et non soudé	83
Figure 6.1 Courbe contrainte-déformation ($\sigma - \varepsilon$) du tube non soudé	88
Figure.6.2 Disposition des éprouvettes le long de la circonférence du tube et à travers la paroi.....	89
Figure.6.3 Comportement contrainte-déformation des 39 éprouvettes soudés	89
Figure.6.4 Courbes contrainte-déformation ($\sigma-\varepsilon$) des tubes soudés	90
Figure 6.5 Comparaison entre les courbes $\sigma-\varepsilon$ représentatives pour les spécimens non soudés (CI, CM et CE) et spécimens soudés (CIS, CMS et CES).....	92
Figure 6.6 Comparaison entre les courbes $\sigma-\varepsilon$ des échantillons soudés.....	93
Figure 6.7 Variation du module de young pour différentes positions	94
Figure 6.8 Variation de la contrainte au seuil d'écoulement pour différentes positions	95
Figure 6.9 Variation de la contrainte nominale à la rupture pour différentes positions	95
Figure 6.10 Variation de la déformation à la rupture pour différentes positions	96
Figure 6.11 Variation du contrainte d'étirage à froid pour différentes positions.....	96
Figure 6.12 Étendue de la variation d'étirage à froid pour différentes positions	97

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Illustration du cycle de soudage bout à bout	19
Tableau 1.2 Illustration du cycle de soudage par électro-fusion	22
Tableau 1.3 Illustration du cycle de soudage par fusion à soquette	24
Tableau 1.4 Illustration du cycle de soudage par fusion à selle -fusion	26
Tableau 1.5 Caractéristiques mécaniques et structurelles du PE80 et PE100	31
Tableau 1.6 Comparaison des propriétés mécaniques des joints soudé b-à-b et joint soudé par électrofusion	32
Tableau 1.7 Qualité du joint soudé basé sur le mode de rupture et le facteur de soudabilité	37
Tableau 2.1 Propriétés du matériau - HDPE 100	44
Tableau 2.2 Condition de soudage b-à-b	46
Tableau 4.1 Dimensions des tubes après usinage des couches intérieure, moyenne et extérieure pour les tronçons soudés et non soudés $e_{min}(\text{après-usinage}) \leq 4 \text{ mm}$	71
Tableau 4.2 Opérations de fabrication et conditions techniques de la méthode proposée	72
Tableau 5.1 Dimension des bourrelets de soudure dans la direction circonférentielle	76
Tableau 5.2 Mesure de cristallinité et température de fusion dans les trois couches avec et sans joint de soudure	79
Tableau 5.3 Comparaison des mesures de cristallinité pour les tubes en PE soudés par fusion b-à-b et non soudés	80
Tableau 5.4 Mesure de la micro-dureté à travers la paroi du tube	83
Tableau 5.5 Vue de fractographie MEB au centre des spécimens soudés après essais de traction	85
Tableau 6.1 Comparaison entre $\langle \Delta \varepsilon_{cd} \rangle$, $\langle \Delta \varepsilon_{\text{fluctuation de soudure}} \rangle$, % rupture et les diminutions relatives de σ_y , ε_f , and σ_{cd} pour les couches soudés (CIS, CMS and CES)	91

Nomenclature

Paramètre	Désignation	Unité
a_p	profondeur de coupe	(mm)
C	chaleur spécifique de HDPE	(J/kg.K)
D_i	diamètre intérieur	(mm)
D_e	diamètre extérieur	(mm)
e	épaisseur du tube	(mm)
E	module d'élasticité	(MPa)
f_i	facteur de soudabilité	-
G	longueur de la jauge	(mm)
h	coefficent de convection	(W/m ² K)
I	incrément d'espace radial	-
j	incrément d'espace axial	-
k	exposant du temps	-
L	longueur de section étroite de l'éprouvette	(mm)
L_0	longueur totale de l'éprouvette	(mm)
n_r	nœud radial	-
n_z	nœud axial	-
P	pression de soudage	(MPa)
R_i	rayon intérieur de l'éprouvette	(mm)
R_e	rayon extérieur de l'éprouvette	(mm)
r_i	rayon intérieur du tube	(m)
r_e	rayon extérieur du tube	(m)
T	température du tube	(°C)
T_0	température ambiante	(°C)
T_a	température de l'air	(°C)
T_p	température de la plaque chauffante	(°C)
T_f	température de fusion	(°C)
t	temps	(s)
t_{eg}	temps de la phase d'égalisation	(s)
t_{ch}	temps de la phase de chauffage	(s)
$t_{retrait}$	temps de la phase de retrait de la plaque	(s)
t_{so-ref}	temps de la phase de soudage et refroidissement	(s)
V	vitesse d'avance	(mm / tr)
V_c	vitesse de coupe	(m/min)
W_c	largeur de section étroite	(mm)
W_o	largeur totale	(mm)
z	longueur du tube	(m)
Abréviations		
ADI	direction alternée implicite	
b-à-b	bout à bout	
BFW	butt fusion welding	
CND	contrôle non destructifs	

CINS	couche interne non soudée
CMNS	couche moyenne non soudée
CENS	couche externe non soudée
CIS	couche intérieure soudée
CMS	couche moyenne soudée
CES	couche extérieure soudée ;
DSC	analyse enthalpique différentielle
E/F	Electrofusion
HAZ	zone affectée thermiquement (ZAT)
HDPE	Polyéthylène de haute densité
ISO	International organisation for standardisation
MHv	Micro-Hardness Vickers
MDPE	polyéthylène moyenne densité
MFI	Indice de fluidité
MI	micro-indentation
MZ	zone de fusion ou (ZF)
PE	Polyéthylène
SDR	rapport de dimensions standard
TA	analyse thermique
TOFD	time of flight diffraction
WAXS	wide-angle X-ray scattering

Lettres grecques

λ	conductivité thermique du tube	(W/m K)
σ_{cd}	contrainte d'étrage à froid	(MPa)
σ_f	contrainte à la rupture	(MPa)
σ_y	contrainte au seuil d'écoulement	(MPa)
ε_f	déformation à la rupture	(%)
ε_{max}	déformation maximale	(%)
ΔH_f^0	enthalpie de fusion du polymère 100% cristallin	J/g
$\Delta \varepsilon_{cd}$	étendue du contrainte d'étrage à froid	(%)
ρ	masse volumique du polyéthylène	(kg/m ³)
Δr	pas d'espace radiale	(mm)
Δz	pas d'espace axiale	(mm)
Δt	pas du temps	(s)
χ	taux de cristallinité	(%)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale :

Les réseaux de canalisations enterrés constituent la grande partie des moyens de transport et de distribution d'eau (fluide incompressible) et de gaz naturel (fluide compressible) à des pressions relativement importantes. Techniquement, plusieurs méthodes ont été développées pour joindre deux bouts de tubes en usant de la chaleur pour faire fondre le HDPE et sa propriété de thermoplastique pour assurer un mélange de matière en fusion résistant et tenace. Il est clair que plusieurs facteurs entrent en jeu et les conséquences d'un mauvais joint sont désastreuses pour la sécurité des vivants et sur la contamination de l'environnement causé par les pertes d'eau. Les tubes de PE possèdent également l'avantage majeur de pouvoir être assemblés par des techniques de fusion efficaces et faciles à mettre en œuvre comme l'électro-soudage et le soudage bout-à-bout.

Le soudage bout-à-bout (b-à-b) est une méthode qui se confirme pour son efficacité à joindre les tubes thermoplastiques sur les chantiers des travaux. Il consiste à assembler des thermoplastiques par la fusion des extrémités des deux tubes en question grâce à une plaque chauffante appelée miroir. Le cycle du soudage b-à-b est divisé en quatre phases : égalisation, chauffage, retrait de miroir, soudage et refroidissement. Il est nécessaire de contrôler plusieurs paramètres lors du soudage du HDPE, la température de la plaque chauffante, l'alignement et l'ovalité des tubes, la pression à l'interface, la durée du chauffage, la distance entre tubes (gap initial). Avec les techniques nouvelles, ces paramètres peuvent être contrôlés de manière automatique [1]. Ces opérations permettent d'éviter des défaillances dès les premiers temps de la soudure. En général, 3 éléments contribuent à obtenir une soudure (b-à-b) acceptable : (i) propreté des surfaces des joints (enlèvement de tout contaminant, selon la procédure), (ii) une formation technique adaptée et qualifiée pour le manipulateur et enfin (iii) un équipement de soudage correctement dimensionné et contrôlé par ses propres opérations de maintenance durant le service (selon les procédures) [1, 2]. De nombreuses recherches ont été menées sur le soudage par fusion bout à bout des tubes en polyéthylène dans des conditions de service et à l'échelle du laboratoire. Les objectifs variaient de la compréhension des mécanismes du processus de soudage et les phénomènes responsables de la formation du bourrelet de soudure à des simulations numériques couplant à la fois les effets thermiques et mécaniques. Autres sujets industriels et méthodologiques traitent le diagnostic des défauts et des méthodes de contrôle qualité pour les tubes soudés, tels que la détection des défauts par imagerie thermique (IR) ou inspection par réseau à ultrasons [3,4]. En outre, d'autres études spécifiques comprennent la caractérisation mécanique des pipes en HDPE [5, 6, 7], aspects thermiques [8]

et les phénomènes de rupture [9,10, 11,12] ont été effectués. Dans le soudage b-à-b du tube en polyéthylène, la déformation du matériau, le changement de la structure microscopique, la solidification, la relaxation des contraintes et autre processus sont les conséquences des facteurs thermiques et mécaniques qui affectent la qualité d'une soudure bout à bout. Dans le but d'établir les effets de soudage b-à-b sur les propriétés mécaniques et thermique du matériau, nous aurons à traiter deux aspects sur les joints soudés b-à-b des canalisations en HDPE :

Le premier aspect de cette thèse est la modélisation numérique des phénomènes thermiques du soudage b-à-b du tube en polyéthylène qui doit permettre de simuler les quatre phases du procédé en utilisant des conditions aux limites qui se rapprochent plus du cas réel.

Le deuxième aspect est une étude mécanique de développement d'une méthodologie d'évaluation des propriétés mécaniques d'une soudure b-à-b basée sur des échantillons d'essai normaux longitudinaux qui peuvent être fabriqués par usinage couvrant toute la section transversale d'un tube en plastique soudé bout à bout.

Le présent manuscrit est divisé en six chapitres. Le premier est dédié à l'étude bibliographique des méthodes de soudage du tube en polyéthylène. On commence par la description des principales méthodes du soudage par fusion afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu. La suite de ce chapitre présente les essais expérimentaux disponibles dans la littérature, ainsi que les méthodes de simulation thermique déjà développées.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du matériau et des matériels utilisé dans les essais expérimentales tels que l'opération de soudage, l'usinage en tournage et alésage, les étapes de préparation des éprouvettes d'essais pour les tests de traction, l'analyse enthalpie différentielle, et la micro-dureté ainsi que les moyens microscopique (MEB) pour une investigation des surfaces de rupture. Tous ces essais expérimentaux seront exploités et interprétés dans le cinquième et le sixième chapitres.

Le troisième chapitre présente une analyse numérique par la méthode des différences finies avec le schéma de la direction alternée implicite afin de pouvoir simuler le comportement thermique des quatre phases du procédé de soudage b-à-b (Egalisation, chauffage, retrait de la plaque, soudage et refroidissement). Parmi les objectifs à atteindre dans cette partie est d'illustrer la distribution de la température dans les deux directions axial et radial du tube ainsi

que l'évolution de la température en fonction du temps pour les quatre phases de l'opération de soudage.

Le quatrième chapitre est dévolu à la présentation d'une nouvelle méthode expérimentale basée sur l'usinage qui permet d'accéder aux propriétés mécaniques locales dans les joints de soudure bout à bout. La méthode a été divisé en cinq phases distinctes, chaque phase a son propre protocole d'essais, la plus importante caractéristique de cette méthode est la répartition de la paroi du tube en trois couches : i) interne, ii) moyenne et iii) externe. L'investigation expérimentale de cette méthode tend à éclaircir les deux aspects : la localisation de la résistance mécanique à la soudure et le mécanisme de rupture aux vues des normes existantes [1,13,14].

Dans le cinquième chapitre une analyse dimensionnelle et structurale des joints soudés bout à bout en polyéthylène a été réalisé. L'étude commence par une caractérisation visuelle des bourrelets de soudure puis on a quantifié l'énergie du processus de fusion sensible à la structure en déterminant : i) le taux de cristallinité et la température de fusion ainsi que la mesure de microdureté dans les trois couches et l'examen microscopique des surfaces de rupture en recherchant les faiblesses de soudure.

Le dernier chapitre étudié le comportement mécanique dans les tubes soudés et non soudés dans les trois couches usinées : internes, moyenne et externe, il traite deux aspects : premièrement l'évolution des propriétés mécaniques à travers la soudure et la paroi du tube non soudé (direction radiale) et deuxièmement la variation des propriétés mécaniques autour de la circonférence du tube (direction circonférentielle). Le chapitre est clôturé par une comparaison des comportements et des propriétés mécaniques du tube soudé et non soudé.

Une conclusion générale synthétise les principaux résultats sont aussi axés sur chacun des points sensibles de ce travail. Enfin une liste de références bibliographique est fournie, avant de clôturer la thèse avec les annexes.

Chapitre .1

METHODES DE SOUDAGE DES TUBES EN POLYETHYLENE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction :

Les systèmes de canalisations enterrées en différents types de matériaux (Acier, polymère, cuivre, aluminium ou autres) ont besoin d'être assemblés. De ce fait il y a lieu de raccorder les parties intégrantes de ces systèmes de canalisation. Les techniques appropriées pour l'assemblage prendront en considération le type et l'efficacité de la méthode utilisée pour joindre les tubes et ses composants, ainsi que leur durée de vie. Pour les tubes en polyéthylène de haute et moyenne densité, il existe plusieurs techniques d'assemblage citées dans la littérature et dans les guides des fabricants [15,16], (raccords à compressions, brides, raccords mécaniques, soudage par fusion...) couvrant une large gamme allant du petit au grand diamètre.

Ce chapitre sera consacré à une revue bibliographique des méthodes de soudage du tube en polyéthylène. On commencera par la description des méthodes de soudage des tubes et raccords thermoplastiques : soudage bout à bout, soudage par électrofusion, soudage par fusion à socquette et soudage par fusion à selle puis on abordera une étude mécanique et microstructurale des joints de soudure et enfin on présentera les principales méthodes de contrôle qualités des joints de soudure et on terminera par une analyse des résultats de mesures expérimentaux et numériques de la distribution de la température dans le soudage b-à-b disponibles dans la littérature.

1.2 Méthode de soudage des tubes en polyéthylène par fusion :

Le soudage des polymères fait partie des modes d'assemblages au même titre que le collage ou les techniques d'assemblage mécanique. À la différence d'autres procédés d'assemblage, le soudage par fusion ne s'applique qu'aux thermoplastiques. Ceux-ci possèdent les caractéristiques rhéologiques lors de la fusion (pour les semi-cristallins) ou de ramollissement (pour les amorphes) suffisant pour permettre une interpénétration des couches superficielles nécessaires à leur liaison. Le soudage du polyéthylène par fusion ne fait pas appel à un matériau d'apport dans la liaison et permet aux deux pièces assemblées de reconstituer une structure homogène.

Plusieurs méthodes ont été développées pour joindre deux bouts de tubes en HDPE en usant de la chaleur pour faire fondre le matériau et sa propriété de thermoplastique pour assurer un mélange de matières en fusion devenant résistant et tenace après refroidissement. Il ressort de la littérature que les techniques de soudage des thermoplastiques ont été divisées en deux catégories selon le mode d'obtention de la fusion [15,16]

- La première catégorie est basée sur la génération de l'énergie nécessaire à la fusion par mouvement mécanique comme :
 - Le soudage par vibrations ultrasoniques,
 - Le soudage par friction...
- La seconde catégorie nécessite une source de chaleur externe :
 - Une résistance électrique pour le cas du soudage par électrofusion,
 - Un outil chauffant pour le cas du soudage bout-à-bout, Fusion à socquette et fusion à selle.

Les principales méthodes de soudage par fusion des tubes thermoplastiques sont présentées dans la figure 1.1 Parmi ces techniques le soudage par électrofusion [17] et le soudage par plaque chauffante (soudage bout à bout) [15] sont les méthodes les plus utilisées dans le domaine de distribution d'eau et de gaz naturel des tubes en polyéthylène. Les méthodes de soudage par fusion à socquette et à selle sont utilisées pour le soudage des coudes ou des raccords en HDPE.

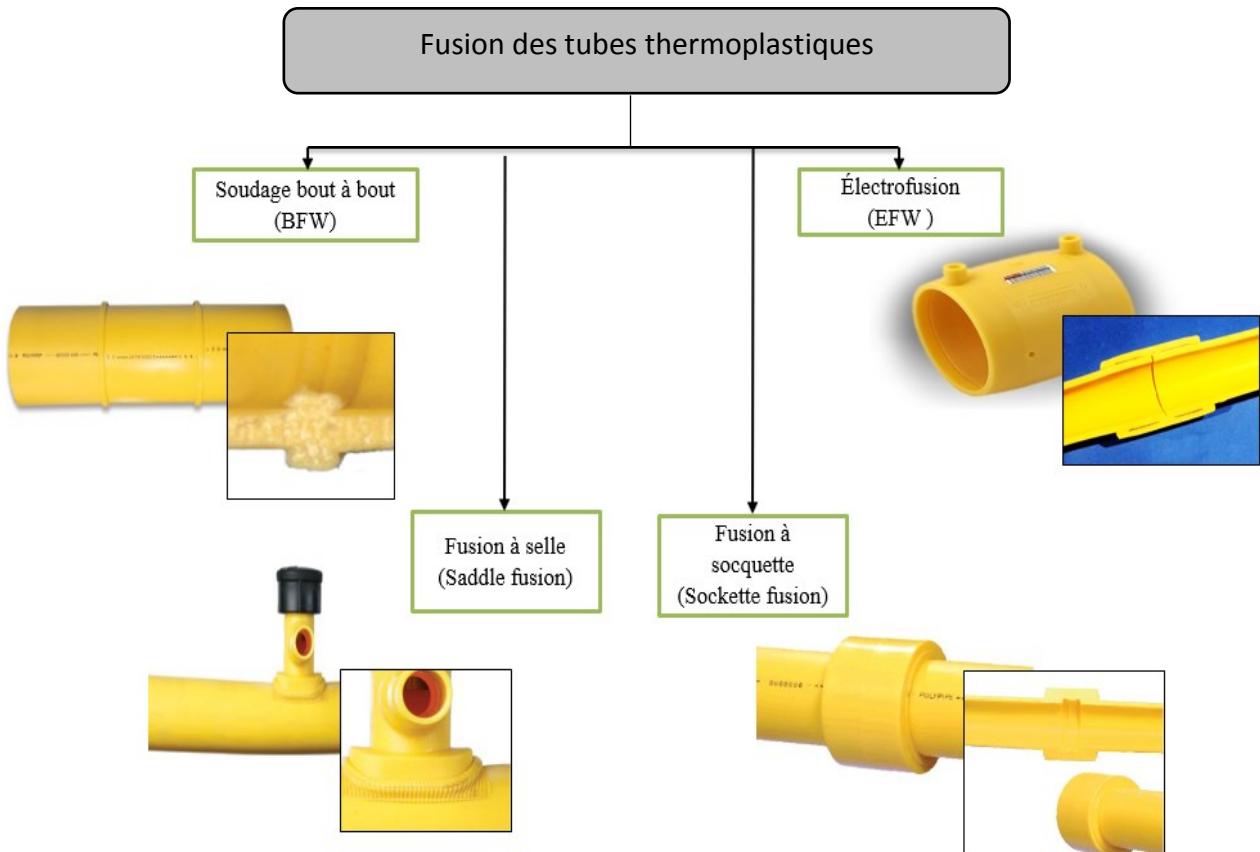


Figure 1.1 : Méthode de soudage des tubes par fusion

1.2.1 Le procédé de soudage bout à bout (Butt fusion joint) :

1.2.1.1 Description générale :

Le soudage bout-à-bout est une méthode qui se confirme pour les diamètres importants allants de 25 à 1200 mm en raison de son efficacité à joindre les tubes et accessoires thermoplastiques.

Le soudage bout-à-bout est une méthode de jonction par laquelle les deux extrémités du tube à assembler sont fusionnées au moyen d'une plaque chauffante appelée « Miroir ». Il s'agit d'une technique simple à mettre en œuvre et peu coûteuse (car pas d'apport de matière supplémentaire). Ce procédé consiste à faire fondre la matière au niveau de la surface à souder, à mettre en contact les parties fondues (les deux bouts du tube) pour en assurer le mélange intime et à laisser refroidir l'assemblage ainsi constitué.

Actuellement, le soudage bout à bout est très utilisé pour assembler les tubes constituant les canalisations d'eau de gros diamètre mais beaucoup moins dans le cas du gaz naturel, pour des raisons essentiellement économiques.

1.2.1.2 Déroulement d'un cycle de soudage b-à-b :

Le procès du soudage bout à bout est divisé en quatre phases distinctes définies dans la littérature et par les fabricants des soudeuses bout à bout [14,15,18] : égalisation, chauffage, retrait de la plaque, soudage et refroidissement bien représenté dans le tableau 1.1 et sur un diagramme (temps – pression – température) dans la figure 1.2

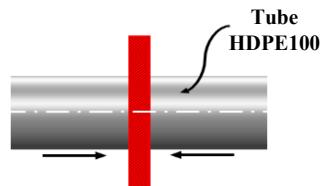
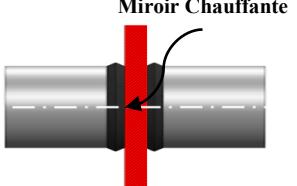
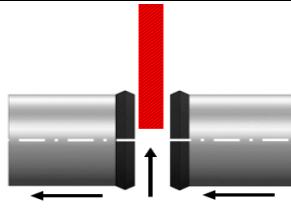
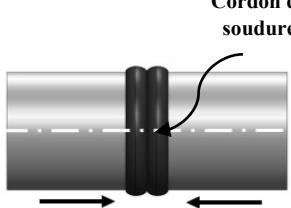
Phase	Figures ajustées
Phase 1 : Egalisation	
Phase 2 : Chauffage	
Phase 3 : Retrait du miroir	
Phase 4 : Soudage et refroidissement	

Tableau 1.1 : Illustration du cycle de soudage bout à bout

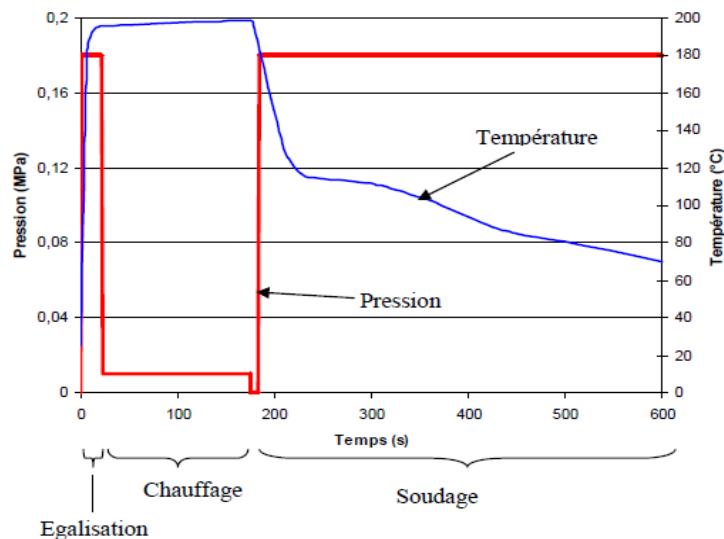


Figure 1.2 : Diagramme temps – pression – température [19, 20]

1.2.1.3 Equipement de soudage bout à bout :

Les machines hydrauliques à souder “bout à bout” sont adaptées pour les matériaux thermoplastiques sous forme des tubes et raccords. Leur cadre d’auto-alignement et leurs dimensions compactes en font des machines très adaptées pour les travaux de construction de réseaux d’eau, de gaz, d’égouts et d’irrigation. Conçut selon la norme ISO 12176-1[18], la machine permet le soudage des tubes PEHD en bout à bout (sans raccords). La machine est du type automatique et ne nécessite pas l’intervention de l’opérateur dans la conduite du cycle de soudage. La traçabilité est également assurée par la machine conformément aux standards internationaux. Les principaux équipements du soudage bout à bout sont présentés dans la figure 1.3.



- 1. Groupe électrogène
- 2. Dispositif de fixation et d’alignement
- 3. Boîte de commande
- 4. Rabot électrique et miroir chauffant
- 5. Tronçonneuse électrique à faible vitesse
- 6. Coupe tube

Figure 1.3 : Equipements du soudage bout à bout [21]

1.2.2 Le procédé de soudage par électrofusion (Electro-fusion joint) :

1.2.2.1 Description générale :

Le soudage par électrofusion est essentiellement utilisé pour assembler des tubes de petit diamètre, il est employé notamment dans l'industrie gazière et dans les réseaux de distribution. Le procédé de soudage par électro-fusion a été bien décrit dans la thèse de Chebbo (2013) [17]. Il consiste à joindre des tubes à l'aide d'un manchon muni d'un élément thermoélectrique (manchon, prise de branchement...) apportant par effet de Joule la quantité de chaleur nécessaire pour générer la fusion [22,23]. Ces raccords dits « électro-soudables » comportent un fil chauffant intégré au moment de leur fabrication par injection comme une résistance électrique (*Figure 1.4*). Cette résistance est assortie de deux connecteurs électriques apparents sur la face extérieure du raccord afin de générer par effet de Joule l'énergie nécessaire pour le soudage. Une fois le contact établi entre les deux corps, la chaleur diffuse de l'accessoire vers le tube pour créer une zone fondu de part et d'autre de l'interface.

Le mode de transfert thermique prédominant dans ce processus est la conduction, la convection et le rayonnement ont été négligés, l'énergie et le temps de fusion sont contrôlés de façon à avoir une zone fondu emprisonnée dans une zone appelée « zone froide » dans laquelle la matière est restée à l'état solide. La faible conductivité du polyéthylène favorise cet emprisonnement de la matière. Ces zones agissent comme une zone de confinement pour empêcher la matière fondu de s'échapper sous la pression liée à la dilatation du polymère. Cette technique possède l'inconvénient majeur d'être coûteuse pour les grands diamètres pour lesquels le prix des pièces de connexion est très élevé.

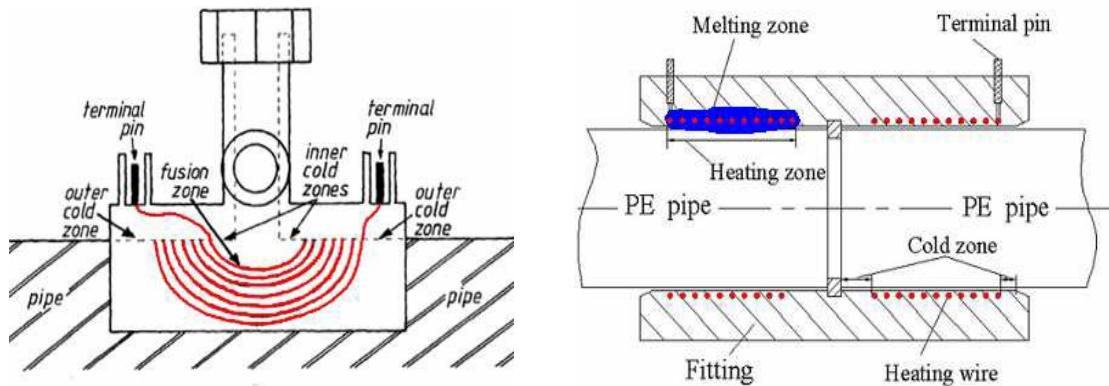


Figure 1.4: schéma représentatif d'un raccord EF avec deux zones de fusion reliés électriquement [22,23].

Les paramètres réglant la soudure par électrofusion sont le temps, la température et la pression de contact entre les surfaces à souder. La température de soudage est un paramètre fixe (autour de 220-230°C) déterminé par les caractéristiques du polyéthylène : température de fusion et conductivité thermique.

Le temps de soudage est un paramètre variable déterminé, d'une part, par l'étendue des surfaces à souder (donc en fonction du volume de matière à fondre) et d'autre part, par les caractéristiques de construction de la spire métallique (longueur, section et matériau).

Différentes gammes d'accessoires de raccordement existent sur le marché. On peut identifier deux familles principales suivant le type d'enroulement du fil : enroulement circulaire autour de l'axe du tube pour les manchons ou autour de l'axe perpendiculaire au tube pour les selles de raccordement. Les raccords électro-soudables peuvent être utilisés avec des tubes en PE80, PE100 pour des rapports diamètre sur épaisseur allant de SDR 7,4 à SDR 33. Le déroulement de l'opération de soudage par électrofusion installation est possible à des températures ambiantes de -10°C à +45°C.

1.2.2.2 Déroulement d'un cycle du soudage par électrofusion :

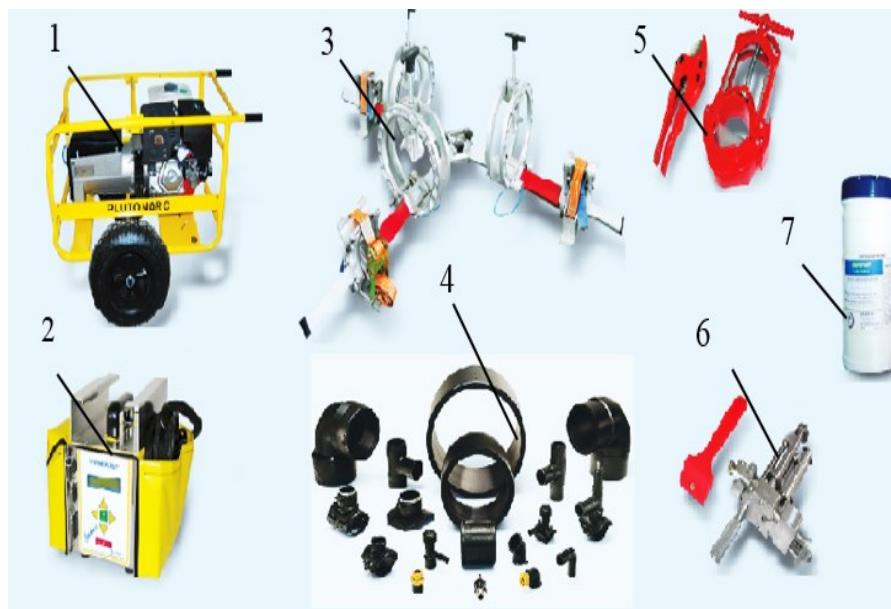
Selon la norme ASTM F2620 [24], le cycle du soudage par électrofusion est divisé en quatre phases distinctes présentées dans le tableau 1.2 :

Phase	Figures ajustées
Phase 1 : Positionnement du manchon	
Positionner le manchon et l'aligner avec les tubes préalablement grattés et nettoyés.	
Phase 2 : Fusion de la matière	
Les spires sous tension se réchauffent et la matière qui se trouve autour du tube commence à fondre.	
Phase 3 : Augmentation de diamètre	
Le tube réchauffé augmente de diamètre et la matière en fusion limitée par les zones froides atteint la pression nécessaire.	
Phase 4 : Jonction complète	
La machine à souder interrompt le débit d'énergie ; à l'issue du temps de refroidissement, la jonction est terminée.	

Tableau 1.2 : Illustration du cycle de soudage par électrofusion

1.2.2.3 Equipement de soudage par électrofusion :

Le soudage par électrofusion est effectué par une appareil spéciale certifiée selon les normes ISO12176-1[18] et ASTM F2620 [24]. Elle permet, après préparation de l'assemblage et identification du raccord (par le biais d'un code à barres), le pilotage automatique de l'opération de soudage jusqu'à son terme. Sur chantier, le recours à une source d'énergie autonome, comme le groupe électrogène, est nécessaire. Il faut veiller à la fiabilité de cet équipement pour s'assurer de la qualité de la tension générée. Cette technique utilise plusieurs types d'élément électro-soudable tel-que : raccord, coude, té, manchon simple et même des manchons à socquette électro-soudable et des manchons à selle électro-soudable. Les principaux équipements de soudage par électrofusion sont présentés dans la figure 1.5.



- 1. Groupe électrogène
- 2. Boîte de commande
- 3. Dispositif de fixation et d'alignement
- 4. Raccord électro-soudable (coude, Manchon)
- 5. Coupe tube adaptée au diamètre considéré
- 6. Outil de grattage
- 7. produit de nettoyage

Figure 1.5 : *Equipement de soudage par électrofusion [21]*

1.2.3 Le procédé de soudage par fusion à socquette (Socket fusion) :

1.2.3.1 Description générale :

Le soudage par fusion à socquette (emboîtement) est une technique largement utilisée pour l'assemblage des systèmes de canalisations thermoplastiques de très petit diamètre (4"ou moins) utilisant des plaques chauffantes de forme et de dimensions personnalisées (figure 1.6) plutôt qu'une surface plane de base. Ces formes permis d'augmenter la surface de contact et de réduire le temps nécessaire pour chauffer et faire fondre le matériau. Son processus consiste à chauffer simultanément la surface externe de l'extrémité du tube et la surface interne du raccord jusqu'à que le matériau atteigne la température de fusion, le temps de chauffage et de refroidissement varié en fonction du type de PE et des dimensions des tubes.

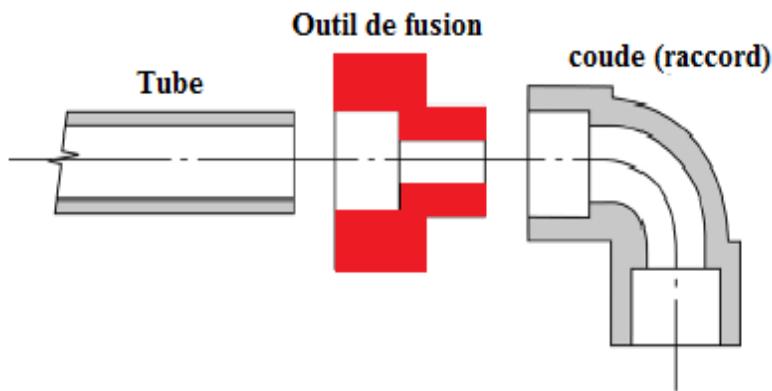


Figure 1.6 : Schéma représentatif du soudage par fusion à socquette (socket fusion)

1.2.3.2 Déroulement d'un cycle de fusion à socquette :

La norme ASTM F2620 [24] divise le cycle de souage par fusion à socquette en deux phase distinct bien illustré dans le tableau 1.3.

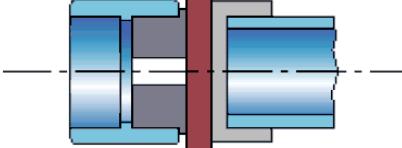
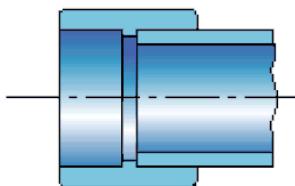
Phase	Figures ajustées
Phase 1 : Alignement et chauffage Assurer le bon alignement de la plaque chauffante avec les surfaces extérieures du tube et la surface intérieure du raccord, vérifiez périodiquement la température de l'appareil de chauffage (température comprise entre 254 et 266 ° C)	
Phase 2 : Soudage et refroidissement Retirez simultanément le tube et le raccord de la plaque chauffante, en effectuant une action très rapide. Insérez immédiatement le tube dans la prise du raccord, tenez ou bloquez le joint en place pour le laisser refroidir à température ambiante	

Tableau 1.3 : Illustration du cycle de soudage par fusion à socquette

1.2.3.3 Equipement de soudage par fusion à socquette :

Les outils de soudage par fusion à socquette comprennent un outil chauffant (plaques chauffantes) avec une forme spéciale qui diffère de la plaque chauffante du soudage b-à-b, ils contiennent : des faces d'outils chauffants, des colliers arrondis (bagues froides), des outils de

jauge de profondeur / chanfrein /tubes/ raccords (figure1.7) fabriqués selon les spécifications ASTM F2620 [24].



Figure 1.7 : Equipements du soudage par fusion à socquette

1.2.4 Le procédé de soudage par fusion à selle :

1.2.4.1 Description générale :

Le soudage par fusion à selle est appelé aussi soudage de la paroi latérale est une autre méthode qui est basée sur le soudage à plaque chauffante comme la fusion bout à bout et la fusion à socquette. Leur procédé se diffère du procédé de fusion à emboîtement et de fusion b-à-b, il consiste à chauffer simultanément la surface externe du tube et la surface correspondante du raccord de type "selle" avec des outils chauffants de forme concave et convexe jusqu'à ce que les deux surfaces atteignent la température de fusion appropriée (figure 1.8). En rapprochant les deux surfaces fusionnées et en laissant le joint refroidir tout en maintenant une force appliquée.

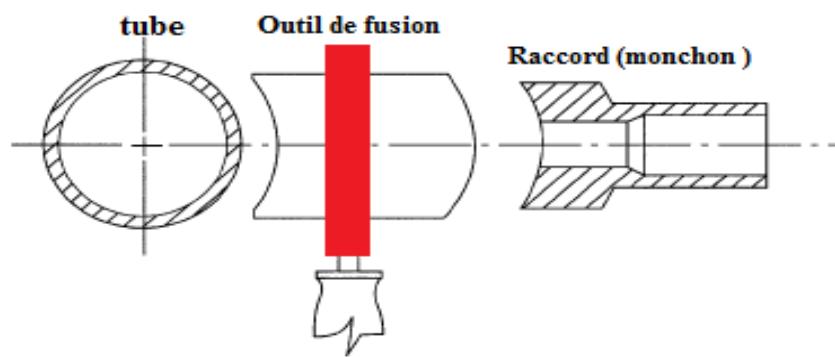


Figure 1.8 : Schéma représentatif du soudage par fusion à selle (saddle fusion)

1.2.4.2 Déroulement d'un cycle de fusion à selle :

La plupart des procédés de soudage ont un cycle détaillé à suivre. La norme ASTM F2620 [24] a devisé le cycle de souage par fusion à selle en deux phase distinct bien illustré dans le tableau 1.4 :

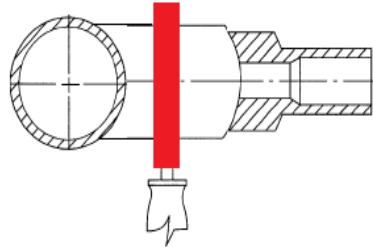
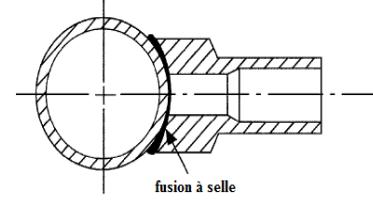
Phase	Figures ajustées
Phase 1 : chauffage Chauffer pendant une période allant de 40s à 90s en appliquant une force de pression pour établir le lien de fusion entre la surface des deux éléments concave et convexe et développer un cordon de fusion initiale	
Phase 2 : soudage et refroidissement Retirez l'élément chauffant, après 3 secondes, poussez le raccord fondu sur le tube afin qu'il soit en contact avec le collier de serrage et laissant le joint refroidir avec le maintien sous pression.	

Tableau 1.4 : Illustration du cycle de soudage par fusion à selle

1.2.4.3 Equipment de soudage par fusion à selle :

La méthode de la fusion à selle utilise un appareil qui offre à l'opérateur un meilleur alignement et un meilleur contrôle de la pression nécessaire, ce qui est très important pour la qualité du joint de fusion. Cet appareil doit avoir une puissance et un contrôle suffisants pour maintenir la température des surfaces à souder (concaves et convexes), il se fixe à la conduite principale, arrondissant et soutenant la conduite principale pour un bon alignement entre le tube et le raccord (figure 1.9). Il s'applique également et indique la force de pression nécessaire pendant le processus de fusion. Un support ou une traverse est fixé à un diamètre de 168 mm à un tuyau principal plus petit en face de la zone d'installation du raccord pour soutenir le tube principal et faciliter l'arrondissement du tube.



Figure 1.9 : Equipements du soudage par fusion à selle

1.3 Etude mécanique et microstructurales des joints de soudure :

1.3.1 Hétérogénéité de la structure de la soudure :

Les procédés de chauffage et de refroidissement de la soudure créent des microstructures qui diffèrent du matériau non soudé. En principe, les propriétés mécaniques et la résistance interfaciale du joint soudé sont affectées par l'épaisseur de la zone fusionnée (MZ), car les couches minces provoquent la fragilité de la soudure et réduisent sa résistance. par conséquent pour une zone de fusion avec une épaisseur importante et une zone affectée thermiquement (HAZ) plus large la résistance de la soudure devient très importante.

En outre, les contraintes résiduelles sont généralement causées par l'hétérogénéité du gradient de température pendant le soudage. Barber, Atkinson [25, 26] ont identifié certaines caractéristiques microstructurales des soudures en polyéthylène, qui expliquent la nature des différentes zones trouvées en matière de flux de matériau et la distribution de la température qui en résulte. Ils ont devisé la microstructure de la soudure bout-à-bout en cinq zones (i) le plan moyen du reste de la peau après fusion ; (ii) sphérolitique, légèrement allongée ; (iii) en colonne ; (iv) la nucléation aux limites ; et (v) sphérolitique (figure 1.10). La dernière zone faite des sphérolites a été reconnue comme la morphologie de base de polymères semi-cristallins.

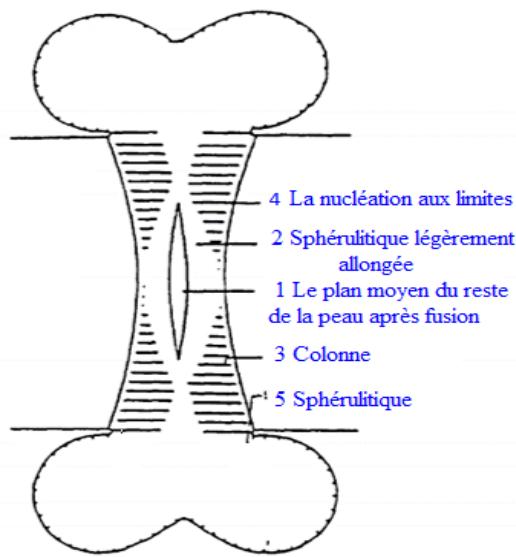


Figure 1.10 : Microstructures d'une soudure bout à bout du tube en HDPE [25,26]

1.3.2 Micro et Nano-indentation :

Les micro- et nano-indentations sont des nouvelles techniques qui sont devenues très utiles dans la caractérisation des matériaux complexes comme les polymères. La nano-indentation (NI) est une traduction de l'essai de dureté macroscopique par indentation à l'échelle nanométrique [27,28]. La technique (NI) consiste à utiliser un pénétrateur très dur (généralement à base de diamant synthétique) d'une géométrie connue pour effectuer des indentations tout en mesurant très précisément la force et la profondeur. La courbe charge-déplacement est utilisée, conjointement avec les propriétés du matériau et la géométrie du pénétrateur, pour déduire les propriétés du matériau. La technique de (NI) a été utilisée pour mesurer la variation des propriétés du matériau à travers les soudures en HDPE. Une grille

d'indentation est placée au centre de la paroi de la canalisation à travers la zone de la soudure, comme indiqué sur la figure 1.11 pour chaque échantillon.

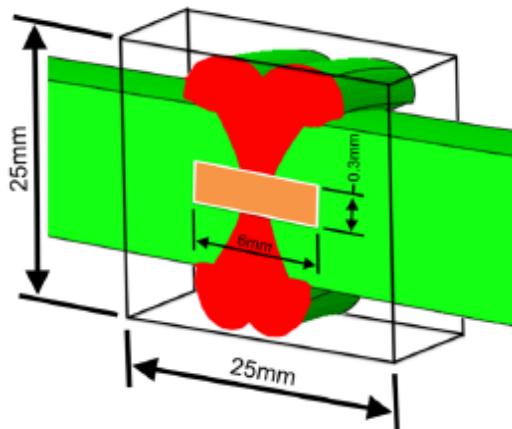


Figure 1.11: Emplacement d'une grille d'indentation au centre du cordon de soudure[27]

1.3.3 Délimitation de la zone affectée thermiquement (ZAT) :

La zone affectée thermiquement ou Heat Affected Zone (HAZ) est la zone de matériau de base (non fusionné) qui a subi des changements dans ses propriétés microstructurales en raison de l'exposition à des températures élevées à cause de la chaleur de soudage. Cette zone n'étant pas observée visuellement, son existence dans le soudage bout à bout des tubes en HDPE a été indiquée par les nouvelles techniques d'indentation. Shaheer et al [27] ont montré que la taille du joint de soudure et ses propriétés micromécanique ont subi des changements.

La technique de Nano-Indentation a également indiqué la présence d'une zone affectée thermiquement « HAZ » autour de la zone de Fusion « MZ » caractérisé par une augmentation progressive des propriétés mécaniques du matériau de base. Il était prévu que la microstructure de la soudure et les propriétés micromécaniques soient différentes en raison des paramètres de soudage différent. Il a été également observé que la taille la plus petite de la zone de fusion se trouve au milieu de la paroi du tube et s'élargit progressivement au fur à mesure qu'elle atteint les frontières extérieures et intérieures (figure 1.12)

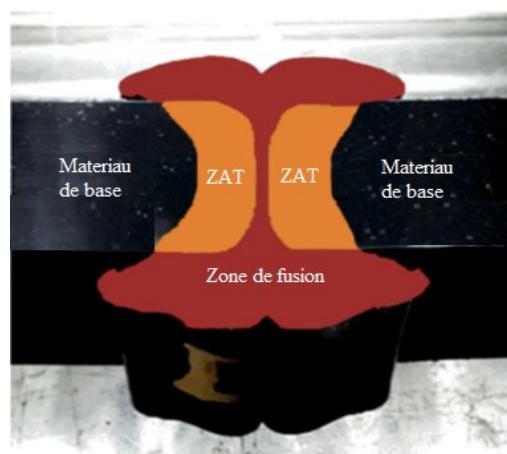


Figure 1.12 : Schéma représentatif du MZ et HAZ dans une soudure b-à-b [27]

1.3.4 Effets des conditions de soudage :

Dans une enquête cherchant à réduire la taille du bourrelet du joint soudé bout-à-bout, Riahi et al ont examiné 9 expériences avec différentes conditions de température, de pression et de temps de chauffage définis pour chaque étape. La résistance mécanique obtenue à la soudure effectuée à 210°C et 0,18 MPa a montré des valeurs importantes. Cependant, la résistance aux chocs de la soudure formée à 180°C est la plus élevée.

La Figure 1.13 indique la formation et le développement du bourrelet de soudure durant la phase de chauffage pour trois conditions différentes (TA₃, TB₃, TC₁). Parmi les résultats obtenus, la condition de soudage à 180° et de 0.03 MP donne la taille de bourrelet la plus petite que les autres conditions. [29]

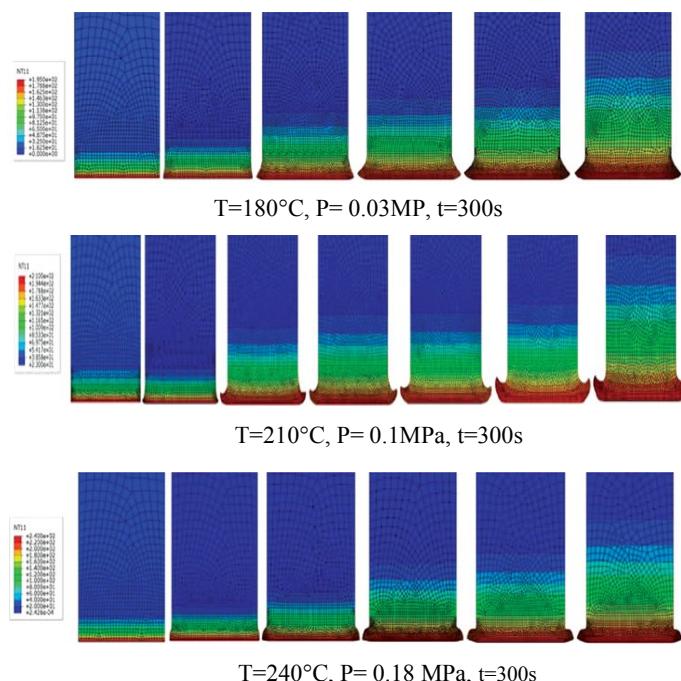


Figure 1.13 : Forme du bourrelet de soudure en fonction des conditions de soudage (Temps, Pressions, Températures) [29]

Dans une autre étude menée par Shaheer et al [27], six procédures de soudage avec des différentes conditions ont été examinés (WP₁, WP₂, WP₃, WP₄, WP₅ et WP₆) pour produire des soudures différentes et voir l'effet de la variation des conditions de soudage sur l'évolution de la température. (La figure 1.14) illustre le cycle de soudage complet pour les six procédures testées avec des plages de températures présentées par couleur, qui permet une comparaison plus simple de la distance parcourue par la chaleur en fonction des conditions du soudage et du temps nécessaire.

Les données pour toutes les procédures ont été extraites d'une longueur de 25 mm au centre de la paroi du tube, et le modèle a continué à fonctionner pendant 600 s supplémentaires pour inclure l'étape de refroidissement.

La fin de la phase de chauffage est marquée par une ligne noire pour chaque procédure, la région rouge indique la zone de température du matériau à 128 ° C.

On peut voir sur la figure 1.14 que pour les WP₃ et WP₆, la profondeur du matériau au-dessus de 128°C, c'est-à-dire la zone de fusion non déformée, augmente légèrement après la fin de la phase de chauffage.

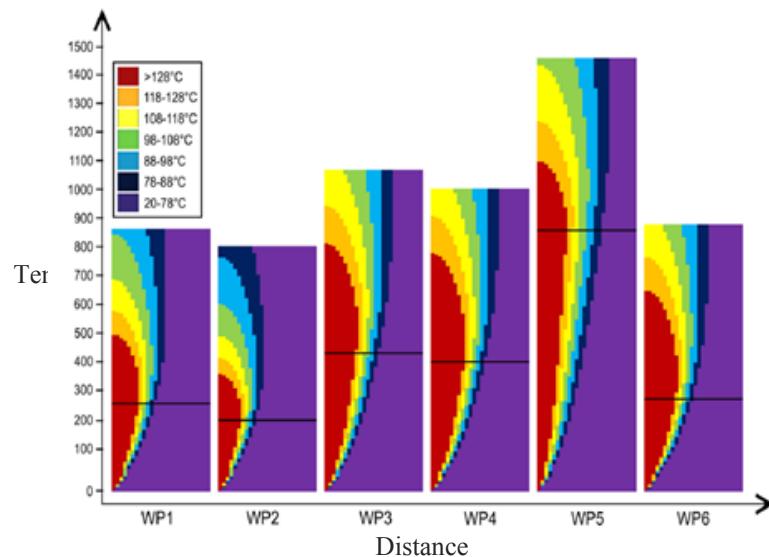


Figure 1.14 : Profils de température en fonction des conditions de soudage [27].

1.3.5 Soudage des résines différentes :

Dans une enquête cherchant à comprendre la formation des microstructures au niveau du joint soudé bout-à-bout, deux types de polyéthylène ont été soudés (PE80 et PE100) (Figure 1.15), l'analyse montre que le soudage de ce type mixte de polythène conduit à la formation de cristallites mieux ordonnées, restructurant de la phase cristalline et des zones amorphes avec des propriétés mécaniques et thermiques plus élevées en raison de l'augmentation de la quantité et de la taille des cristallites. Le tableau 1.5 illustre les caractéristiques mécaniques et structurelles des PE80 et PE100 et leurs soudures mixtes. La technique de diffusion des rayons X à grand angle (WAXS) montre que les taux de cristallinités des deux types de résines de PE-80 et PE-100 sont presque égaux (environ 56% pour PE-80 et 57% pour PE-100).



Figure 1.15: Soudure bout à bout des deux résines PE80/PE100 [28]

On peut voir aussi que le taux de cristallinité et la déformation à la rupture du matériau mixte soudé en (PE80/PE100) sont plus élevés que du matériau de base en PE80 et PE100.

Les résultats présentés sont en corrélation avec les résultats des DSC avec des différences qui peuvent être expliquées par les conditions des essais [28]

Spécimens	Taux de cristallinité DSC (%)	Taux de cristallinité WAXS (%)	Contrainte (Mpa)	Déformation (%)
PE-80	42	56	19.6	100
PE-100	51	57	23.1	100
Soudure mixte PE-80/PE-100	53	66	Rupture hors joint de soudure	>100

Tableau 1.5 : Caractéristiques mécaniques et structurelles du PE80 et PE100 et leurs soudures mixtes [28]

1.3.6 Comparaison des propriétés mécaniques du soudage bout à bout et par électrofusion :

Les tubes en polythène de haute densité ont été utilisés dans des conditions critiques, en contact de pétrole, de gaz, de l'eau et d'autres produits chimiques. Pour des conditions de fatigue, des échantillons soudés par électrofusion (E/F) et bout à bout (b-à-b) ont été soumis à la flexion. La rigidité et la résistance du joint en électrofusion étaient bien inférieures à celle de la fusion bout à bout et aussi à celle du cas du tube non soudé voir (tableau 1.6).

La courbe contrainte-déformation montre que la rupture des échantillons soudés bout à bout a été observée au niveau de la zone de fusion, alors que pour les échantillons soudés par électrofusion, elle a eu lieu au joint de fusion (figure 1.16).

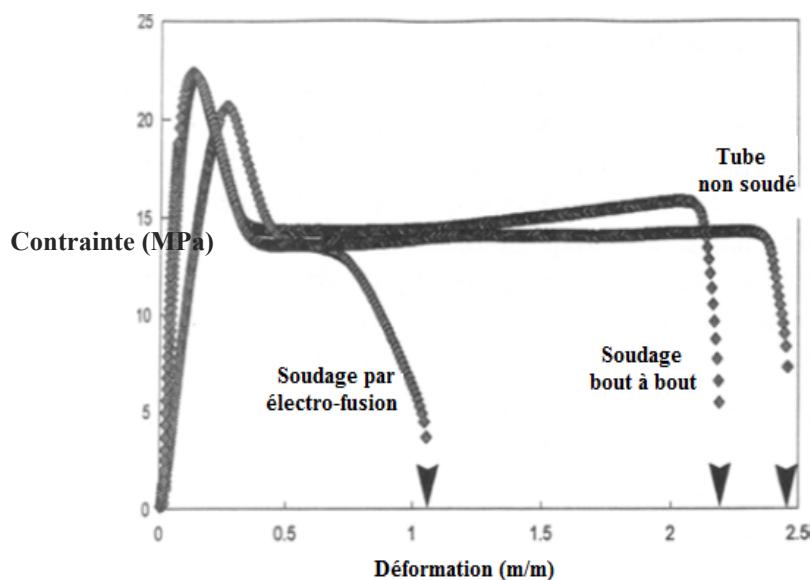


Figure 1.16 : Comparaison des courbes (contrainte-déformation) du tube non soudé avec du tube soudé b-à-b et par électrofusion [30]

Aussi, la résistance à la fatigue du joint bout-à-bout était supérieure à celle de l'E/F. Enfin, il a été noté que la résistance à la fatigue-flexion du joint bout-à-bout était bien supérieur à celle de l'électrofusion et inférieur au matériau de base (non soudé) [30] En outre, les résultats de traction ont montré que dans des conditions optimales de jonction, la qualité des joints de soudure b-à-b peut être aussi bonne que celle du tube d'origine [31].

Technique de soudage	Module d'élasticité (MPa)	Contrainte au seuil d'écoulement (Mpa)	Allongement à la rupture (%)
Tube non soudé	308	23	246
Soudé b-à-b	227	22.0	224
Soudé par électrofusion	158	20.0	70

Tableau 1.6 : Comparaison des propriétés mécaniques des joints soudé b-à-b et joint soudé par électrofusion [30]

1.3.7 Effet des environnements agressifs sur les propriétés mécaniques des tubes en HDPE :

Lorsque des spécimens standards ont été exposés à des environnements agressifs, il a été constaté que les propriétés mécaniques des couches internes, moyennes, et externes ont suivi une tendance de dégradation similaire. Le toluène-méthanol est le plus agressif suivi de l'acide sulfurique, puis l'eau distillée (figure 1.17). Il a été également constaté que le module de Young et la limite d'élasticité augmentent de l'extérieur vers les couches intérieures dans tous les environnements de tests. Une telle progression était essentiellement attribuée aux changements de la cristallinité combinée avec des contraintes internes incorporées dues au processus d'extrusion et à la géométrie du tube [32, 33, 34].

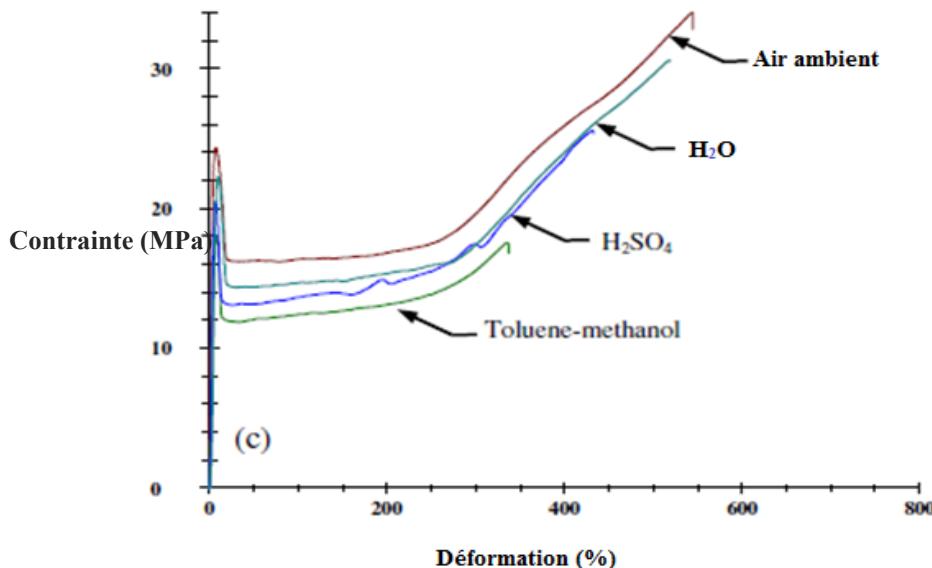


Figure 1.17 : Courbe contrainte-déformation de la résine du tube en HDPE exposé dans diverses solutions (mélange de toluène-méthanol, H_2SO_4 , Eau distillée) [32].

Dans une autre étude, il a été noté que les propriétés mécaniques de la couche interne sont beaucoup mieux que ceux de l'extérieur. Le durcissement plastique est important à la surface extérieure en raison des contraintes résiduelles compressives communiquées par le procédé d'extrusion [35].

1.4 Contrôle qualité du joint de soudure :

L'expérience des utilisateurs confirme que la bonne réussite d'une jonction dépend du respect des procédures et de l'emploi des dispositifs d'alignement et de positionnement [18, 19, 24]. Il est nécessaire de contrôler plusieurs paramètres lors du soudage du HDPE. Il y a la T° de la plaque chauffante, l'alignement et l'ovalité des tubes, la pression à l'interface, la durée du chauffage, la distance entre tubes. Avec les techniques nouvelles, ces paramètres peuvent être contrôlés de manière automatique. L'examen et les essais des soudures des tubes en PE ont été généralement basés sur des contrôles destructifs et non destructifs. Ces techniques se sont avérées très efficaces pour évaluer les soudures et de s'assurer que la préparation de surface est correcte.

1.4.1 Contrôle non destructif CND :

Les méthodes de contrôle non destructifs CND vont du simple au compliqué. Les imperfections de surface invisibles peuvent être révélées par des méthodes pénétrantes ou magnétiques. Si l'on découvre des défauts de surface vraiment graves, il est souvent inutile de procéder à des examens plus compliqués de l'intérieur par ultrasons ou radiographie [36]. Les méthodes de contrôle non destructifs récemment utilisées pour l'évaluation des soudures par fusion bout à bout sont : contrôle visuel [21], contrôle par ondes millimétriques [37], contrôle par ultrasons (UT) [38,39,40] et contrôle par micro-ondes (Microwave) [41]. L'inspection visuelle est la plus simple de toutes ces techniques. Une évaluation préliminaire avec imagerie par ondes millimétriques et imagerie par micro-ondes a été réalisée. La plupart des nouveaux travaux de recherche sont dirigés vers l'évaluation des soudures avec des techniques ultrasonores.

1.4.1.1 Contrôle visuel :

Le contrôle visuel est généralement réalisé sur chantier immédiatement après la fin de l'opération de soudage. L'examen visuel des soudures est une technique CND particulièrement utile car elle fournit beaucoup d'informations sur la préparation de la soudure, la contamination potentielle, l'alignement et les pressions de soudure et surtout le contrôle des bourselets à la fin de l'opération de soudure. La forme du cordon obtenu est utilisée généralement pour donner une première indication visuelle de la qualité d'une soudure. La figure 1.18 montre une procédure pour le contrôle visuel des défauts de soudure sur chantier due au non-respect des conditions de soudage. La valeur de l'examen visuel des soudures en HDPE est souvent sous-

estimée parce que beaucoup de gens ont été conditionnés à se fier à la radiographie ou aux ultrasons dans le soudage traditionnel des métaux.

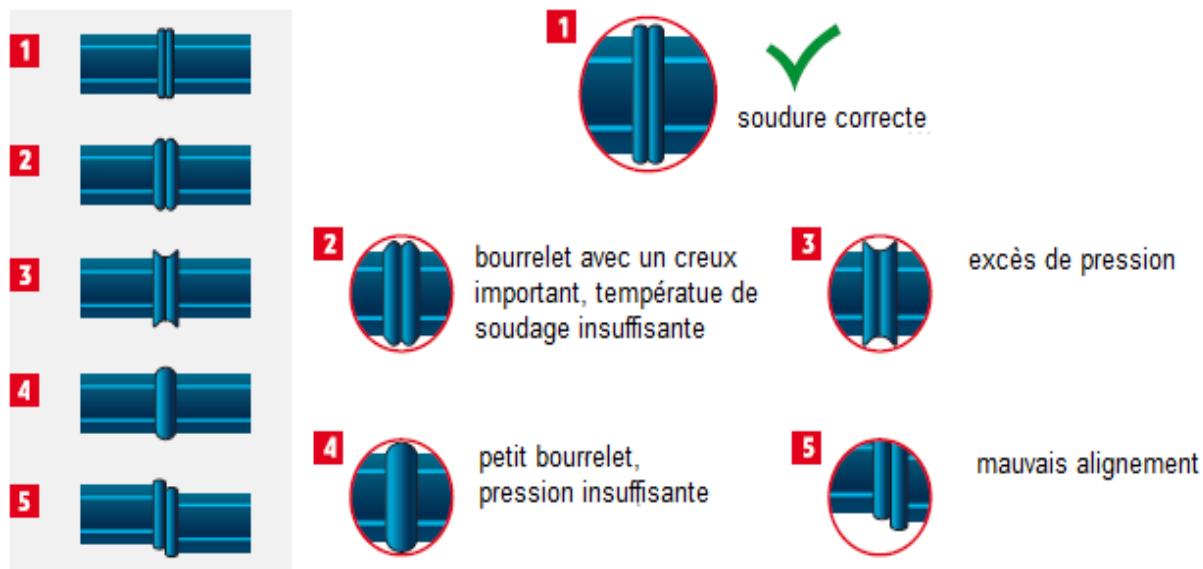


Figure 1.18 : procédure de contrôle visuel du bourrelet de soudure sur chantier [21]

Conformément à la norme ASTM F2620 [24] des assemblages fusionnés bout à bout du tube en PE, le cordon de soudure doit être arrondi de taille uniforme sur les deux. La largeur des bourrelets de soudure doit être d'environ 2 à $2\frac{1}{2}$ fois la hauteur du cordon. La rainure en V entre les cordons de soudure ne doit pas être plus profonde que la moitié de la hauteur du cordon (voir figure 1.19).

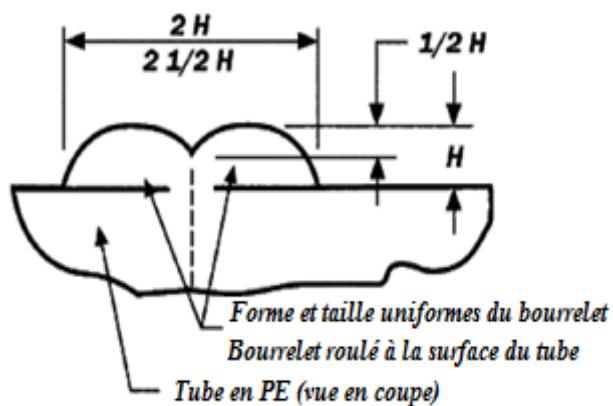


Figure 1.19 : Dimensions et forme du cordon de soudure normalisé [24]

1.4.1.2 Contrôle par ultrason :

La technique de contrôle par ultrasons (UT) des matériaux en polyéthylène est difficile en raison de la grande atténuation de l'énergie du faisceau ultrasonore (c'est-à-dire que le polymère absorbe presque toute l'énergie sonore). Le matériau PE présente peu d'anisotropie et aucun ajustement de la sensibilité n'est requis lors des essais dans différentes directions. La

vitesse acoustique dépend de la température et par conséquent, le refroidissement des soudures aux conditions ambiantes est effectué avant l'inspection. Des appareils ultrasonores très puissants / riches en fonctionnalités ont été développés au cours des 30 dernières années, ce qui a permis d'améliorer les capacités de détection grâce à une meilleure transmission des signaux et à une meilleure interprétation et traitement des signaux (figure 1.20)

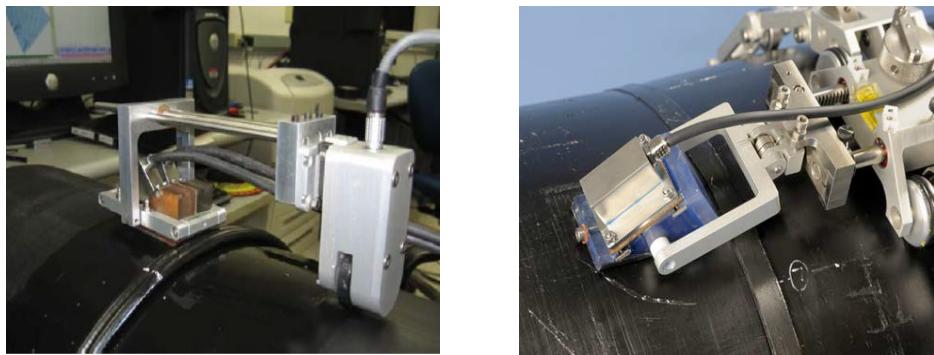


Figure 1.20 : Technique de contrôle par ultrason [39]

L'inspection des défauts de soudure du joint bout à bout du tube en HDPE nécessite l'utilisation des techniques des ultrasons angulaires. Il existe quatre types de techniques angulaires utilisées individuellement ou en combinaison (figure 1.21) : (i) l'auto-tandem, (ii) l'écho impulsif sectoriel, (iii) l'onde rampante et (iv) la diffraction par temps de vol (TOFD) [38]. Ces méthodes d'inspection angulaire sont adaptées pour le contrôle non destructif des joints soudés bout à bout et ont une capacité très limitée pour l'inspection des joints par électrofusion.

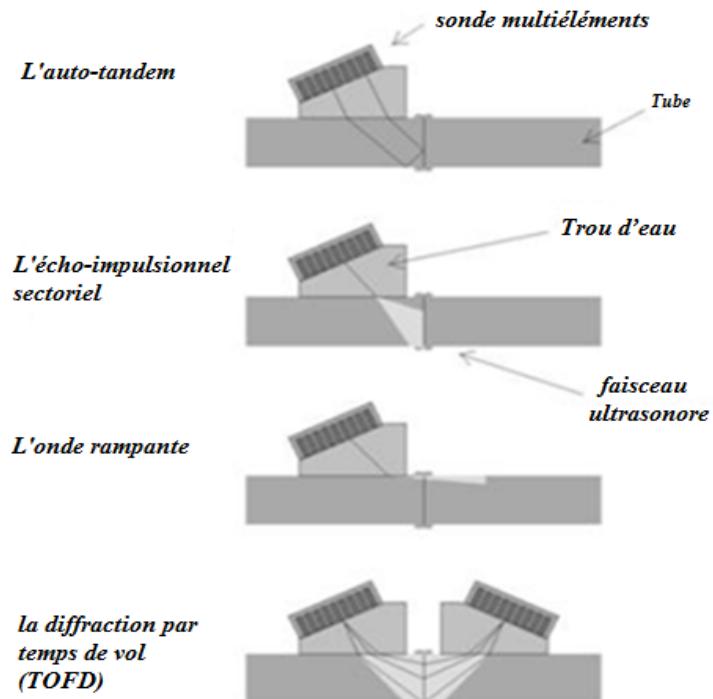


Figure 1.21 : CND par les techniques des ultrasons angulaires [38]

1.4.1.3 Contrôle par Micro-onde :

La méthode de (CND) par micro-onde (Microwave) est utilisée dans le soudage bout à bout et par électrofusion des tubes thermoplastiques (figure 1.22), elle est capable de traverser multiples couches de matériau. Elle fonctionne en utilisant une sonde contenant un transducteur pour baigner la zone de la soudure avec une énergie micro-ondes de basse tension et un récepteur pour mesurer l'intensité du champ résultant. Une image est générée en utilisant l'intensité de champ mappée à l'emplacement de la sonde sur la pièce inspectée. Les signaux de détection sont réfléchis aux interfaces où la constante diélectrique varie (par exemple, fissures, soudures à froid, trous, inclusions, contamination, impuretés, etc.). La possibilité de superposer des balayages successifs au fil du temps permet de déterminer le taux de croissance d'un défaut[40].



Figure 1.22 : Technique de CND par Micro-onde
a) Soudure par EF et b) soudure bout à bout [41]

1.4.2 Contrôle destructif (CD) :

Le contrôle qualité du joint soudé bout à bout des tubes thermoplastiques dépend essentiellement aux propriétés mécaniques du matériau, des conditions et procédure du soudage. Parmi les méthodes de contrôle destructifs : essais de traction, essais de pliage, essais de dureté....

Il existe une variété de normes d'essais qui sont utilisées dans les contrôles destructifs. Par exemple pour les essais de traction des soudures bout à bout en PE on cite les normes : ISO21307, BS EN 21814, ISO 13953, ASTM D 638. Ces normes sont appliquées sur des échantillons soudés découpés au centre de la soudure et testés en laboratoire ou sur terrain. Généralement, ces essais exigent que l'éprouvette soit défaillante de manière ductile, par conséquent le mode de défaillance doit être interprété à partir de l'échantillon.

Quatre modes de défaillance ont été identifiés et un critère de rupture a été établi pour classer la qualité d'un joint fondu (tableau 1.7) : (I) mauvais [Bad], (II) pauvre [Poor], (III) bon [Good] et (IV) excellent [Excellent] [31].

Parmi les propriétés mécaniques des matériaux considérés, la déformation maximale (Max strain) et la contrainte maximale (Max Stress) se sont révélés être les paramètres les plus acceptables pour distinguer entre les différentes qualités des joints de soudure.

Mode de rupture	f_i (basé sur ε_{max})	Endroit de la rupture	Qualité du joint de soudure
I	< 0.12	Dans la soudure	Mauvais
		Hors soudure	Eprouvette défectueuse
II	0.12 – 0.56	Dans la soudure	Pauvre
		Hors soudure	Bon
III	0.57 – 0.99	Dans la soudure	Bon
		Hors soudure	Excellent
V	≥ 1	Sur soudure ou hors soudure	Excellent

Tableau 1.7 : Qualité du joint soudé basé sur le mode de rupture et le facteur de soudabilité [31]

Les modes de défaillance ont été choisis selon le facteur de soudabilité (f). Ce dernier est le rapport des propriétés mécaniques du tube soudé et non soudé, il est calculé par la formule de Barber et al [42] :

$$f_i = \frac{\varepsilon_{max \text{ materiau soudé}}}{\varepsilon_{max \text{ materiau non soudé}}} \quad (1.1)$$

1.5 Méthodes expérimentales et numériques du soudage bout à bout :

1.5.1 Mesure expérimentale de température :

Le protocole expérimental utilisé dans la thèse de Hehn [15] consiste à planter des thermocouples de très fine épaisseur à l'intérieur des deux bouts des tubes à souder afin de mesurer l'évolution de la température au cours des quatre phases du soudage b-à-b. (La figure 1.23) montre le positionnement des thermocouples situés à différentes distances de l'extrémité du tube.

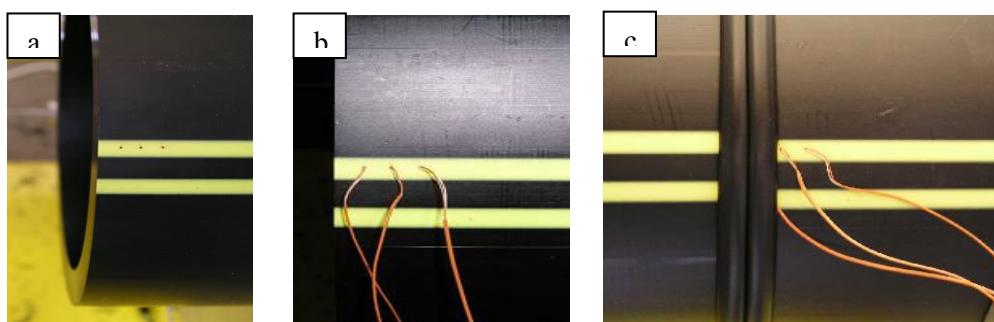


Figure 1.23 : Protocole expérimental de mesure de la température dans le soudage b-à-b [15]
Perçage des trous, b) mise en place des thermocouples, c) position des thermocouples après soudage

Il a été montré que la quantité de polymère fondu et la température de la matière influent sur la taille et les caractéristiques de la soudure car le volume du bourrelet et la rhéologie du polyéthylène seront affectés. Lors de la phase de soudage, la matière va se refroidir de façon différente suivant la localisation dans la soudure par exemple, la surface se refroidit plus rapidement que le centre de la soudure entraînant des microstructures variées (figure 1.24). L'évolution de la température dans plusieurs endroits du tube doit être connue. Ce qui donne la possibilité d'estimer la taille de la profondeur de fusion, des vitesses de chauffage et de refroidissement lors du procédé de soudage.

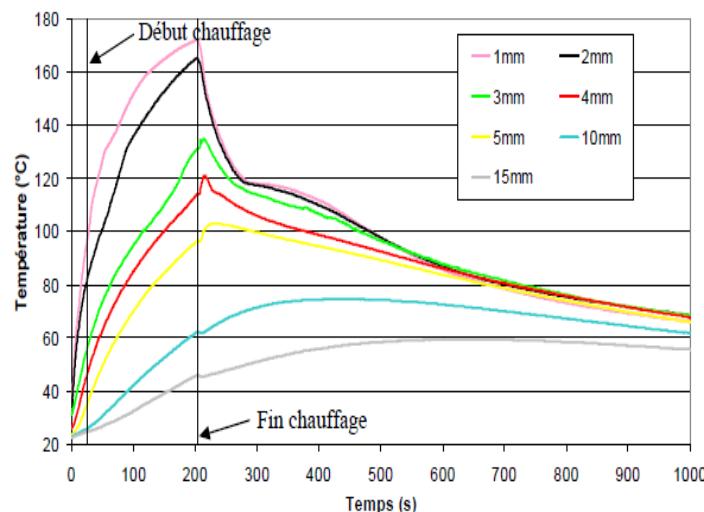


Figure 1.24 : Evolution de la température dans le soudage b-à-b de l'interface du tube au cours du temps à différentes positions [15].

Lors des phases d'égalisation et de chauffage (de 0 à 200s), la matière chauffe avec une vitesse très élevée, la ramenant proche du miroir chauffant ainsi, à 1 mm du plan de soudage le tube chauffe rapidement pour atteindre plus de 170°C à la fin du chauffage alors qu'à 15 mm du plan de soudage la matière n'atteint que 45°C au bout de la même durée. Ceci permet d'estimer la vitesse de chauffage (entre 130°C et le maximum de la courbe) de la matière à 1 mm du plan de soudage à environ 45°C/min. Les températures atteintes dans ce cas en fin de chauffage sont sensiblement inférieures à celles obtenues à 1 et 2 mm du plan de soudage au centre de la paroi. Ceci peut s'expliquer par le fait que les thermocouples, se déplaçant avec le bourrelet, s'éloignent de la zone de contact entre le miroir et le tube diminuant ainsi l'apport de chaleur par conduction lors du chauffage.

1.5.2 Simulation thermique :

Parmi les premiers travaux de simulation du soudage bout à bout du tube en HDPE, on cite ceux de Shillitoe et al [43] qui ont utilisé le logiciel ABAQUS pour simuler le procédé de soudage bout-à-bout. Ils se sont intéressés uniquement aux trois premières secondes de la phase d'égalisation en basant sur la méthode des éléments finis. Le calcul est fait sur une seule direction (1-D), un maillage comprenant seulement 2 mm de profondeur à partir du miroir chauffant (figure 1.25). Cette simulation est restreinte au niveau du contact miroir-tube.

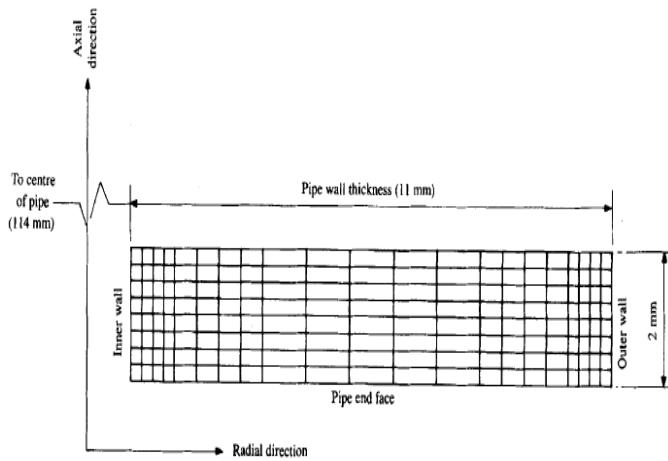


Figure 1.25 : Allure du maillage du tube après 3s dans la phase d'égalisation [43]

Benkreira et al [44] se sont intéressés à la phase d'égalisation avec un modèle de lubrification. Le modèle permet de déterminer la vitesse d'avancée du tube ainsi que la taille de la couche de polymère fondu durant cette phase. Le modèle permet aussi de déterminer la position du plan de cisaillement nul et la position du plan où s'effectue le changement de phase de l'écoulement suivant le rayon (figure. 1.26). Le champ de la température n'a pas été étudié.

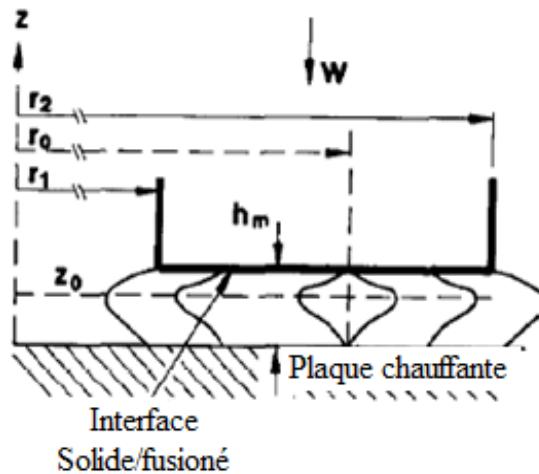


Figure 1.26 : Allure simplifiée de l'écoulement au niveau de la soudure [44].

D'autre part Wood [45] a présenté un modèle numérique en 2-D pour simuler le transfert thermique dans les tubes thermoplastiques durant les phases de soudage bout à bout, il a utilisé la méthode des différences finies schéma explicite dans la région proche au plan de soudage, des changements de variable ont été faits afin que le modèle soit simple et stable. Les résultats ont été présentés uniquement pour 3 phases (égalisation, chauffage, retrait de la plaque) dans la direction axiale pour une très courte profondeur 5 mm. La direction radiale n'a pas été traitée. Les résultats numériques de l'évolution de la température en fonction du temps dans la phase de retrait de la plaque chauffante ne concordent avec les valeurs expérimentales que pour les premières secondes (figure. 1.27)

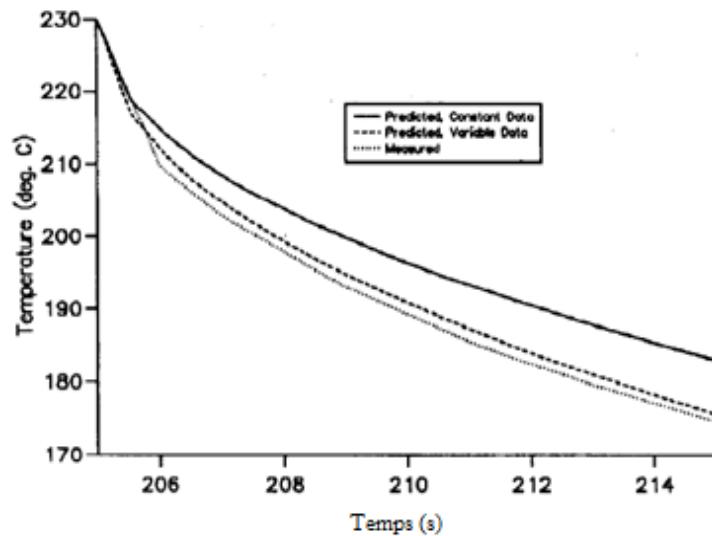


Figure 1.27 : Evolution de la température expérimentale et numérique de la phase de retrait de la plaque chauffante au centre de la paroi du tube [45].

Enfin Hehn et al [15] ont étudié expérimentalement et numériquement le procédé de soudage bout à bout des tubes en HDPE. Leur méthode expérimentale a été présentée dans le paragraphe 1.8.1

Les résultats expérimentaux ont été comparés à ceux obtenus par simulation à l'aide du logiciel Forge (figure 1.28).

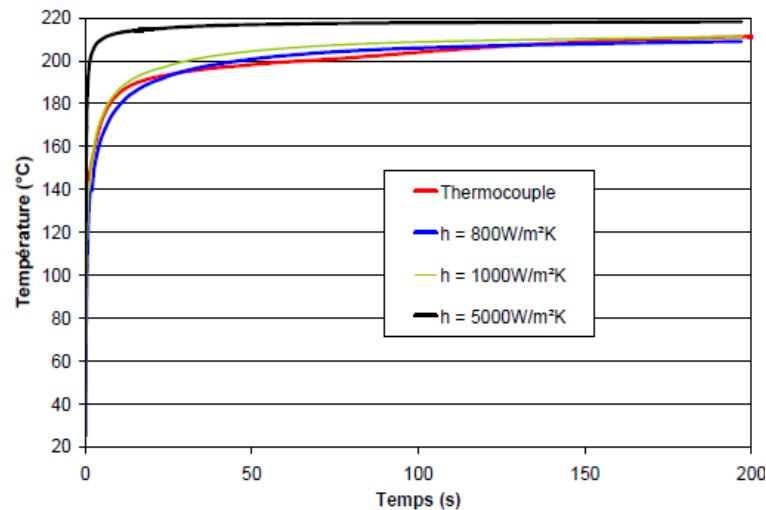


Figure 1.28 : Evolution de la température à l'interface miroir/tube mesuré et calculé durant les phases d'égalisation et de chauffage [15]

Ce dernier est principalement destiné au forgeage des métaux, son utilisation par Hehn et al au soudage en polyéthylène a nécessité l'adaptation de certains nombres de caractéristiques du procédé de soudage et de la matière utilisée. Les échanges de chaleur entre le miroir et la matière sont contrôlés par la température du miroir ($T=220$ °C) et le coefficient d'échange entre les deux parties. Le coefficient d'échange entre la matière et le miroir a été déterminé de façon à ce que l'évolution de la température calculée à l'interface reproduise au mieux la variation de

température mesurée par les thermocouples. Les difficultés liées au logiciel ont imposé à Hehn et al d'utiliser des conditions aux limites du type « Newman », flux imposé sur tout le contour du tube d'où à chaque fois une nouvelle valeur du coefficient d'échange, $h = 800, 1000$ et $5000 \text{ W/m}^2\text{k}$ (figure 1.28) est injectée. Ce procédé se déroule jusqu'à l'obtention d'une température fixe à la surface miroir-tube. Ce choix d'hypothèse ne correspond pas au cas réel.

N.P Starostin et al [46] ont proposé un modèle mathématique basé sur l'équation de chaleur en coordonnée cylindrique afin d'étudier le soudage bout à bout dans des régions à basse température, condition d'hiver, pour une température ambiante en dessous de -15°C . Le tube étudié est un PE60 de 63mm de diamètre et 5.8 mm d'épaisseur. Il est en isolation thermique latérale dans le but de conserver la quantité de chaleur transmise. Les résultats de l'étude concernent l'influence de la variation de la température ambiante sur la durée de chauffage ainsi que la profondeur de fusion (figure 1.29.a). Dans d'autres travaux de recherche de simulation sur le polyéthylène 100, pour la phase de chauffage N.P Starostin et al [47] ont montré qu'il est possible de contrôler le procédé de soudage bout à bout dans les climats à basse température, en intégrant un élément élastique aux tubes à souder, le champ de température a été calculé dans les deux directions axiale et radiale uniquement pour la phase de chauffage (Figure 1.29. b).

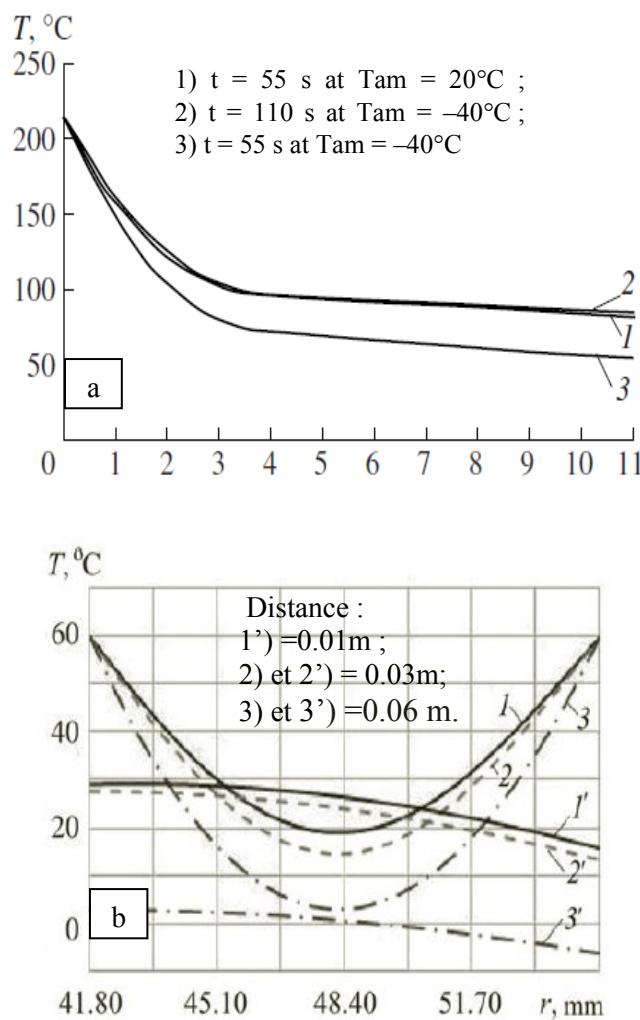


Figure. 1.29 : Distribution de température
a) Dans la direction axiale, b) dans la direction radiale [46,47]

Enfin dans un autre travail de recherche mené par Riahia et al dont le but est de réduire la taille du bourrelet du joint de soudure bout-à-bout [29], 9 expériences avec des conditions de chaleur, de pression et du temps de chauffage pour chaque étape ont été réalisés. L'analyse de la distribution de la température en fonction du temps du processus de chauffage a été effectuée avec l'utilisation de l'équation de chaleur en coordonnée cartésienne par la méthode des éléments finis, le mode de transfert par convection a été négligé. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux de l'expérimentale, les courbes se concordent uniquement dans la profondeur de 2mm (figure 1.30.a et 1.30.b).

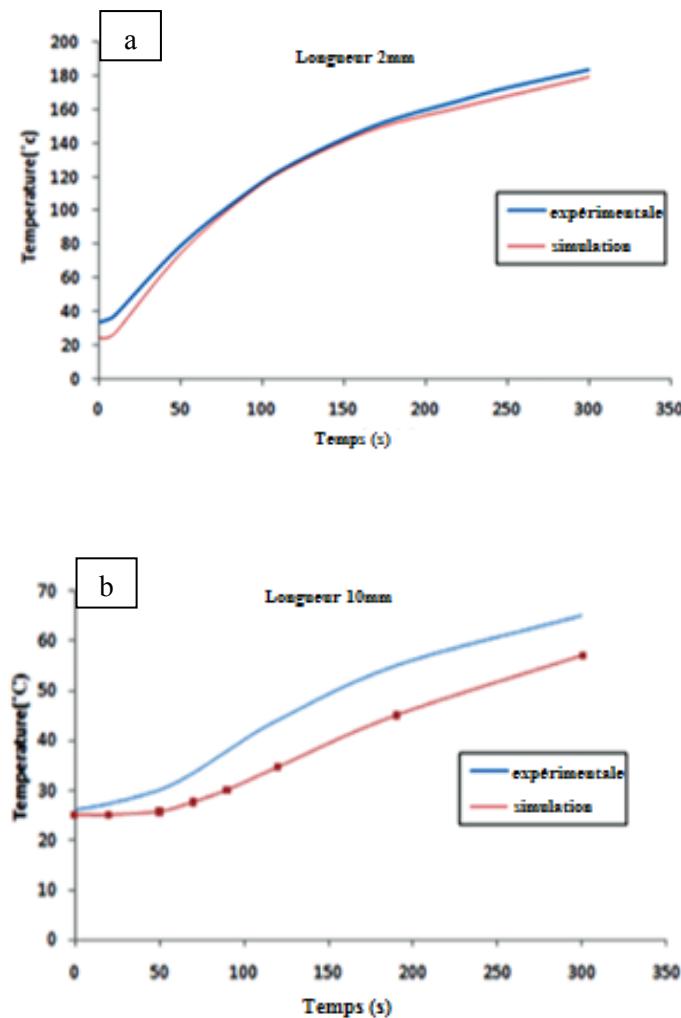


Figure. 1.30 : Evolution de la température mesurée expérimentalement et simulée :
a) longueur $l=2\text{mm}$ et b) longueur $l=10\text{ mm}$ [29].

Chapitre.2

MATERIAU ET MATERIELS D'EXPERIMENTATION

2.1 Introduction :

La compréhension du procédé de soudage bout-à-bout des tubes en polyéthylène consiste à pratiquer et maîtriser l'appareil de soudage bout-à-bout et les mécanismes mis en jeu ainsi que les conditions de soudage : telles que les dimensions des tubes à souder, la température du miroir, la pression appliquée sur les tubes. La plupart des recherches s'intéresse à varier les conditions de soudage dans le but de savoir quelles sont leurs incidences sur le résultat final de la soudure [15, 27, 29]. En complément de ce qu'a été fait dans la littérature nous avons réalisés des soudures dans les mêmes conditions de pression et de température afin d'étudier l'hétérogénéité du matériau fusionné bout-à-bout, leurs propriétés mécaniques ainsi de savoir comment les microstructures sont modifiées par le procédé de soudage en balayant toute l'épaisseur de la soudure. Ce chapitre présente le matériau de notre étude et les différents matériaux utilisés au cours des essais expérimentaux. On abordera la présentation du matériau utilisé, le protocole de soudage bout à bout et l'ensemble des matériaux exploités pour la réalisation de notre étude expérimentale.

2.2 Matériaux :

Le matériau est un polyéthylène à haute densité HDPE-100 de forme tubulaire destiné à la distribution d'eau potable avec une pression nominale de 10 bars ayant un SDR de 17.6, un diamètre extérieur de 200 mm et une épaisseur de 12 mm. Il est fabriqué par extrusion à partir de granulés pigmenté en noir.

PROPRIÉTÉS	VALEUR	STANDARD
Masse volumique (kg/m ³)	949 – 961	ISO-1183
Indice de fluidité MFI (g/10 min)	0.2 – 0.5	
Module d'élasticité (MPa)	> 1100	
Contrainte à la rupture (MPa)	> 24	ISO-527:2
Allongement à la rupture (%)	>500	
Dureté -Shore D à 20 °C	59	ISO-868
Noir de carbone (%)	2.0 – 2.5	ISO-6964
Conductivité thermique (W/m.K)	0.33 – 0.45	DIN-52612
Dilatation linéaire (K ⁻¹)	1.6*10 ⁻⁷ – 2.10 ⁻⁴	DIN-53752

Tableau 2.1: Propriétés du matériau - HDPE 100

Le tableau 2.1 récapitule les principales propriétés mécaniques et thermiques du PE100 à l'état solide et à température ambiante (20 °C) fournies par le fabricant Algérien « STPM CHIALI » [21]. Parmi ces propriétés, l'énergie de traction à la rupture et la contrainte maximale considérés comme les paramètres les plus acceptables pour distinguer les différentes qualités des joints de soudures [48].

2.3 Soudage par fusion bout à bout :

2.3.1 Description de l'appareil d'essais :

Les essais du soudage bout à bout ont été réalisés sur chantier afin d'effectuer des soudures dans des conditions qui se rapprochent plus du cas réel. L'opération de soudage a été déroulé par la machine de soudage b-à-b « BARBARA -J. SAURON (PILOTFUSE UNIT) », Type PL-315 conforme à la norme ISO-12176-3 [18]. L'appareil à souder (figure 2.1) est capable d'effectuer des soudures sur des tubes allant de 160 à 355 mm de diamètre. La différence de potentiel et la puissance nominale sont respectivement 220 V et 6 kVa, Le cycle est piloté automatiquement en fonction des données initiales du tube à souder (Type de PE, SDR, D). L'opérateur intervient uniquement pour la mise en place des outils annexes (rabot, miroir chauffante,) et aux différentes opérations de contrôle visuel (Nettoyage, alignement et planéité des surfaces). La phase du chauffage jusqu'à la fusion du matériau de polyéthylène est réalisée en utilisant une plaque chauffante sous une pression précise développée par un appareil mécanique qui maintient fermement les deux bouts des tubes. Dans l'étape de chauffage la température est maintenue ; cependant, la pression appliquée est réduite pour permettre au matériau fondu de grandir en profondeur. Une fois le temps de fusion est atteint, la plaque chaude est retirée dans un temps très petit pour réduire les pertes de chaleur et les extrémités fondues sont rassemblés rapidement. Enfin, une pression spécifiée est appliquée, permettant à la soudure de se former et à la matière fusionnée de s'écouler en formant un cordon. A l'interface fondu, les chaînes de polymère sont supposées s'introduire les unes dans les autres, puis un refroidissement et une solidification progressifs se produisent à température ambiante [8, 25].



Figure. 2.1 : Opération de soudage b-à-b sur chantier

2.3.2 Conditions du soudage b-à-b :

En théorie, tous les types de PE d'une même famille de viscosité peuvent être soudés les uns aux autres, à condition qu'ils soient du même diamètre et d'épaisseur équivalente. Le fait de souder des tubes de composition différente, même d'une même famille de viscosité, influe sur les propriétés des soudures et nécessite des conditions de soudage adaptées. De plus, la qualité des soudures dépend non seulement des paramètres de soudage (température de miroir, pression appliquée,), mais aussi des conditions extérieures (vent, pluie, T_{amb}). Les paramètres contrôlables et modifiables par l'opérateur sont :

- la température du miroir chauffant
- la pression appliquée sur les tubes au cours de chaque étape
- la durée des différentes étapes de soudage (préparation, chauffage, refroidissement)

La température du miroir doit être supérieure à la température de fusion du polyéthylène mais ne doit pas être trop élevée pour ne pas dégrader la matière. Les conditions des quatre phases utilisées dans cette étude sont présentées dans le tableau 2.2

Paramètre	Phase du soudage b-à-b			
	Egalisation	Chauffage	Retrait de la plaque	Soudage et refroidissement
Pression (N/mm ²)	0.18	< 0.01	–	0.18
Température (°C)	220	220	–	–
Temps (s)	21	180	10	1265

Tableau 2.2: Condition de soudage b-à-b

2.4 Usinage des tubes :

L'usinage du tube en polyéthylène a fait l'objet de plusieurs études en recherchant les conditions de coupe les plus adaptées qui peuvent améliorer la rugosité de surface en même temps, réduisez la chaleur générée sur le bord de contact de la pièce à usiner [10, 11,12]. La matière enlevée a été réalisée sur un tour TOS TENCIN, modèle SN 40 d'une puissance de broche (figure 2.2). Les vitesses de coupe et d'avance disponibles sont respectivement de [45-2000 tr / min] et [0,08-6,4 mm / tour]. Deux lots de tronçons des tubes en PE (3 sections non soudées et 3 sections soudées bout à bout) sont préparés pour fabriquer 6 enveloppes de tube définies par la condition aux limites [14] :

$$e_{(apr\acute{e}s-usinage)} \leq 4 \text{ mm} \quad (2.1)$$



Figure 2.2 : Opération d'usinage des enveloppes soudés et non soudés.

a) Machine de tour TOS TENCIN, modèle SN 40 b) Tournage, c) Alésage

2.4.1 Conditions d'usinage :

Suivant plusieurs recommandations des examinateurs, les conditions d'usinage ont été améliorées afin de produire des éprouvettes normalisées selon la norme ASTM représentant différentes couches à travers la paroi du tube (c'est-à-dire dans la direction longitudinale et radiale). Comme d'habitude, le plus bas niveau possible de déformations, la définition de la génération de chaleur (température de coupe la plus basse), et la rugosité minimum de surface ont été recherchées pour maintenir un minimum de perturbations structurelles à l'intérieur du matériau (condition d'usinage) [10,11,49]. Les opérations d'usinage du tube en polyéthylène s'effectuent sur des manchons en acier rigides. Les cordons de soudures extérieures et intérieures ont été enlevés afin de permettre une manipulation fermée dans les mâchoires de tour [50]. Les conditions de coupe adoptées sont dictées par l'objectif d'un état de surface lisse et régulier sur la paroi du tube ($V=35\text{tr/min}$, $f=0.56\text{mm/tr}$ et $a=1\text{mm}$) [51]

2.5 Préparation des éprouvettes d'essais :

Dans le cadre de cette étude deux types d'éprouvettes ont été préparés. Le premier type concerne des éprouvettes standards de l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques et le second type concerne les éprouvettes utilisées pour le l'étude de la microstructure.

2.5.1 Eprouvette standard :

Les éprouvettes de traction ont été découpées au niveau du complexe CP2K unité PEHD Polymed Sonatrach (Skikda) dans une presse hydraulique, selon les recommandations de la norme ASTM D-638 dans la direction longitudinale (figure 2.3.a), et ce respectant la géométrie d'éprouvette de Type IV [14]. Nous avons deux types d'éprouvettes : (1) éprouvette soudée et (2) éprouvette non soudée et dans chaque type il y a trois couches internes, moyennes et externes

Dans l'éprouvette de type IV, la condition imposée par l'équation. (2.1) sur l'épaisseur reste inchangé. Le joint de soudure doit être exactement centré dans toutes les échantillons soudés (3×13 échantillons), c'est-à-dire à une distance égale à $G / 2$ (figure 2.3.b). Cette

condition est importante car les éprouvettes sont conçues pour évaluer la résistance du joint qui doit être aligné verticalement avec les mâchoires de la machine d'essai de traction.

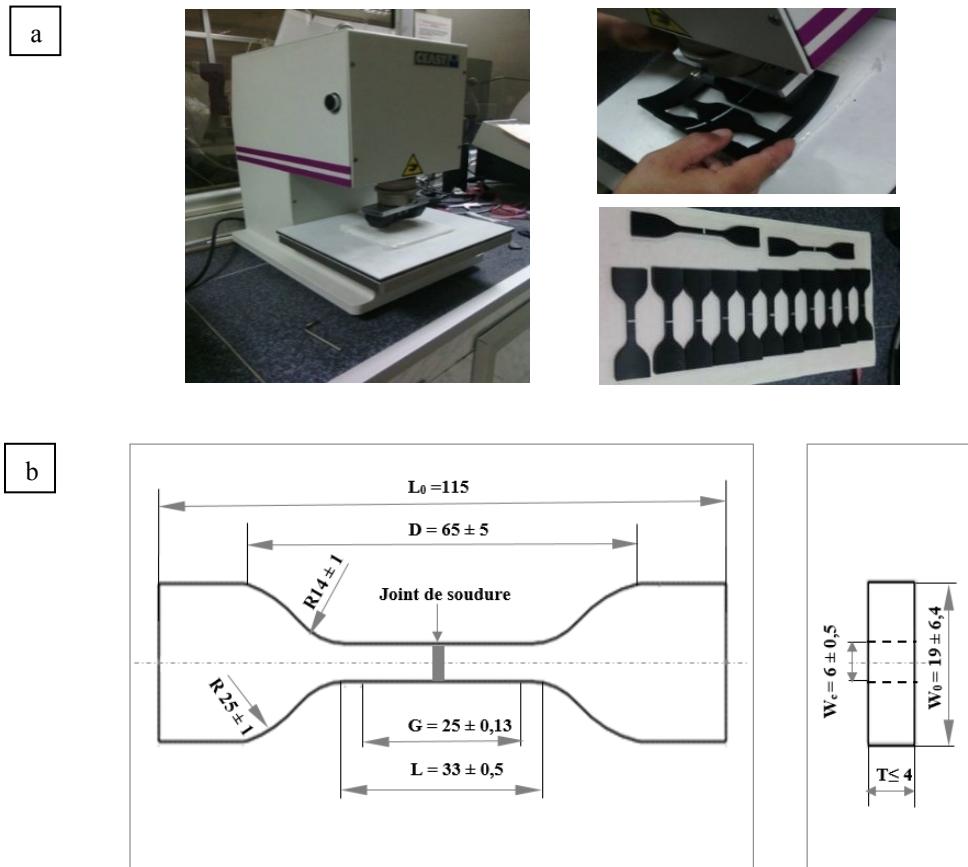


Figure 2.3 : Etape de Préparation des éprouvettes normalisés

a) Extraction des éprouvettes d'essais, b) Dimensions normalisées pour les éprouvettes standard soudées de type IV.

2.5.2 Échantillon pour le DSC :

Les échantillons sont prélevés des trois couches (interne, moyenne et externe) de la paroi du tube non soudé, la même chose pour les tubes soudés mais les échantillons sont pris au centre de la soudure dans la zone de fusion (figure 2.4). Ils ont une masse de $10 \pm 0,5$ mg avec un diamètre de 5mm prélevées à l'aide d'une cisaille métallique [52].

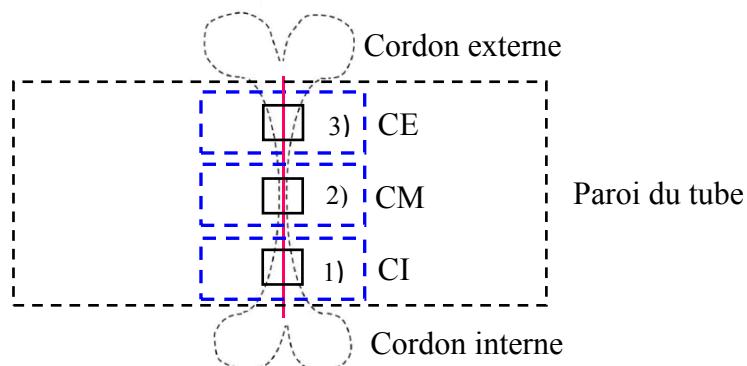


Figure 2.4 : Schéma des plans de prélèvement des échantillons de DSC

Essais de Traction :

2.6.1 Description :

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé dans les caractérisations des matériaux, il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à une traction puis mesurer son allongement. Une simple courbe contrainte-déformation constituera un bon élément de base pour connaître le comportement mécanique d'un matériau donné.

2.6.2 Protocole d'essais :

La machine utilisée est de type Zwick Z010 particulièrement conçue pour la caractérisation des polymères avec une cellule de charge maximal 10 KN. Tous les tests sont exécutés à la température ambiante et à une vitesse d'essais constante ($v=100$ mm/min), vitesse utilisée dans les études antérieures sur le polyéthylène. Ces études ont montré que la vitesse d'essais à un effet significatif sur les propriétés mécaniques du tube en PE, plus elle est élevée plus la limite d'élasticité augmente [24, 42]. L'opération de test et l'acquisition des données ont été surveillées par un système informatique, et les résultats ont été traités via la version du logiciel TestXpert®9.01. Le protocole d'essais est présenté dans la figure 2.5.

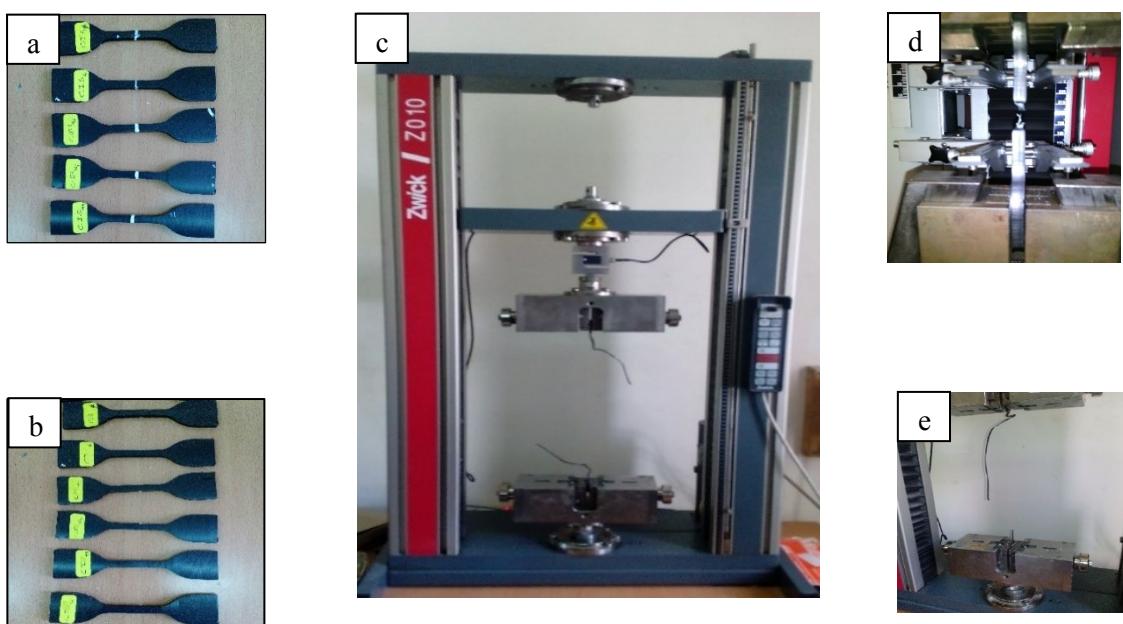


Figure 2.5 : Machine d'essais de traction piloté par ordinateur et les éprouvettes testé

- a) Eprouvettes soudées,
- b) éprouvettes non soudées,
- c) Machine Zwick Z010,
- d) rupture sur soudure,
- e) rupture hors soudure

2.7 Essais de DSC :

2.7.1 Description de la technique :

L'analyse calorimétrique différentielle (DSC) à compensation de flux a été utilisée afin de mesurer les cinétiques de cristallisation du polyéthylène. Le principe de ce système est de mesurer la différence de flux de chaleur nécessaire pour qu'un échantillon et une référence soient à la même température. Une transition thermique (fusion, cristallisation...) subie par

l'échantillon se traduit par un pic sur l'enregistrement du flux thermique en fonction de la température (thermo-gramme). Le flux thermique est la puissance reçue ou perdue par l'échantillon. Quand l'échantillon perd de la chaleur au profit du milieu extérieur, le flux de chaleur est dit exothermique (cristallisation). Quand il吸orbe de l'énergie, le flux est dit endothermique (fusion). Un phénomène exothermique est représenté, sur les thermo-grammes, par un pic orienté vers le haut et un effet endothermique par un pic dirigé vers le bas comme présenté dans la figure 2.6.

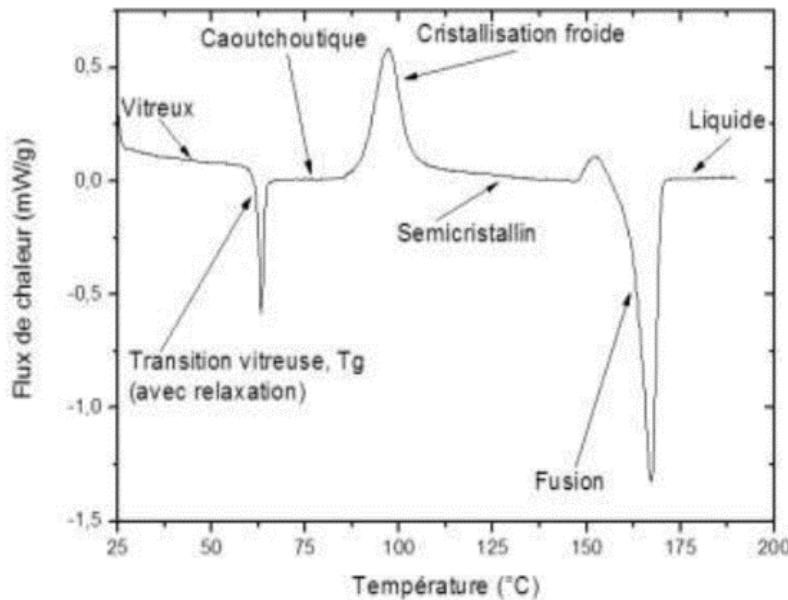


Figure 2.6 : Thermo-gramme DSC.

2.7.3 Protocole d'essais :

Les essais ont été réalisés avec l'appareil de DSC « TA Instrument Universal Analysis 2000 » (figure 2.7) conforme à la norme ISO-11357 [52]. L'appareil est équipé d'un système de refroidissement à l'azote liquide. Les échantillons à analyser sont encapsulés dans une coupelle en aluminium puis placés dans le four de DSC. Une analyse enthalpique isotherme a été réalisée, sous balayage d'azote sec à une vitesse de chauffage de 5°C/min, et une température d'analyse de 10 à 200 °C.



Figure 2.7 : Instrument de Mesure de DSC « TA instrument 2000 »

La vitesse de montée en température choisie est celle utilisée dans la littérature pour les études relatives aux PE [53]. Par ce protocole, on peut déterminer l'enthalpie de fusion du polymère qui est proportionnelle à la quantité de polymère qui se cristallise dans cette plage de température. Les essais ont été réalisés sur des soudures obtenues dans les mêmes conditions de soudage décrites dans le paragraphe 2.3.2. Chaque type de mesure est réalisé trois fois par souci de reproductibilité. Cette analyse vient pour enrichir les résultats des essais de traction et comparer les taux de cristallinité dans les échantillons soudés et non soudés.

2.8 Essais de micro-dureté :

2.8.1 Description :

L'essai de dureté Vickers consiste à appliquer une charge P sur le matériau pendant quelque seconde avec un pénétrateur muni d'une pointe diamantée sous forme de pyramide droite avec une base carrée et un angle de 136 degrés entre les visages opposés soumis à une charge de quelque kilogramme force selon le type de matériau à étudier (figure 2.8). Les deux diagonales du renforcement laissé dans la surface du matériau après le retrait de la charge sont mesurées en utilisant un oculaire micrométrique du microscope. La dureté de Vickers est le quotient obtenu en divisant la charge de kgf par le secteur de millimètre de place du renforcement. Quand la diagonale moyenne du renforcement a été déterminée la dureté de Vickers peut être calculée à partir de la formule :

$$HV = 1.8544 \times 10^6 \times P/L^2 \text{ (kg.mm}^{-2}\text{)} \quad (2.2)$$

Où :

L : Longueur d'indentation diagonale en μm ,

P : la charge appliquée en kg

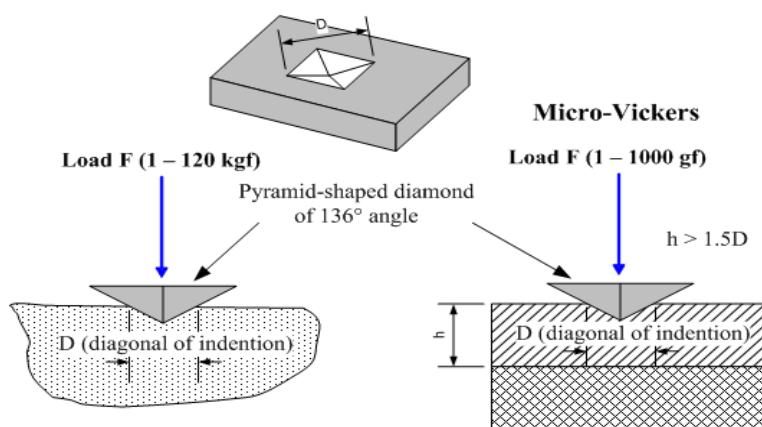


Figure 2.8 : Principe d'indentation Micro-Vickers [54].

2.8.2 Protocole d'essais :

Les essais ont été réalisés sur l'appareil « **INOVATEST NEXUS 4500** » présenté dans la figure 2.9.a conforme à la norme ASTM E384, ils ont été déroulés dans la température ambiante avec une charge de 1Kgf et un temps de 20 s. Les échantillons utilisés ont été polis avec un papier de verre de qualité différente. Les mesures ont été pris sur trois point de

l'éprouvette : 1. Sur zone de fusion, 2. sur le matériau de base et 3. sur la zone affectée thermiquement dans les trois couches étudiées (interne, moyenne et externe) comme indiqué dans la figure 2.9.b

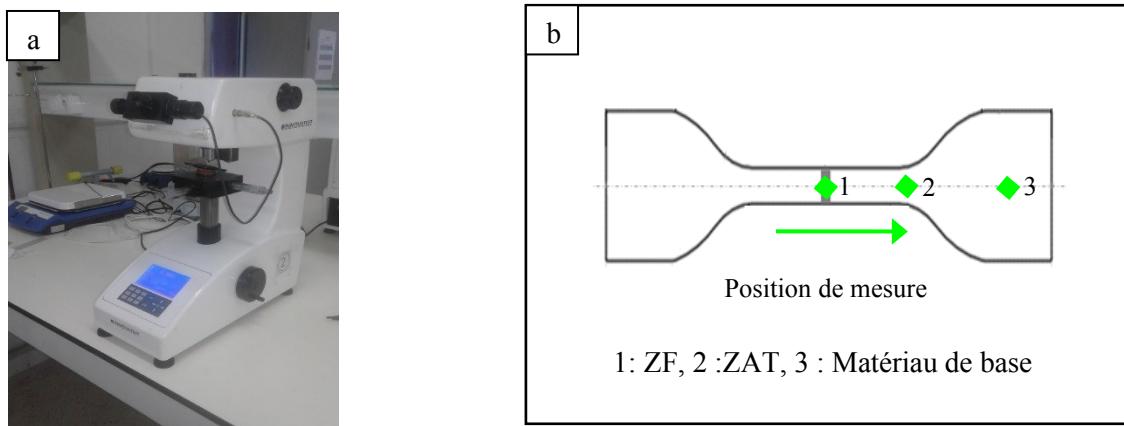


Figure 2.9 : a) Appareil de micro-dureté
b) Représentation des positions d'indentation sur l'éprouvette

2.9 Microscopie à balayage électronique MEB :

Le microscope électronique à balayage (MEB ou SEM en anglais : *scanning electron microscopy*) utilisé a été fourni par la société Carl Zeiss (figure 2.10), il utilise un fin faisceau d'électrons, émis par un canon à électrons permettant d'obtenir une **sonde électronique de très faible diamètre** (de l'ordre du nanomètre au niveau de l'échantillon) transportant néanmoins un courant important (de l'ordre du nanoampère). Des lentilles électromagnétiques permettent de focaliser le faisceau d'électrons sur l'échantillon. L'interaction entre les électrons et l'échantillon provoque la formation d'électrons secondaires de plus faible énergie. Ils sont amplifiés puis détectés et convertis en un signal électrique. Ce processus est réalisé en chaque point de l'échantillon par un balayage du microscope. L'ensemble des signaux permet de reconstruire la typographie de l'échantillon et de fournir une image.



Figure 2.10 : Microscopie à Balayage Electronique
« MEB »

La phase de préparation des échantillons est une phase très importante (figure 2.11). Les échantillons en polyéthylène doivent être déshydratés puis subir un traitement pour devenir conducteur (fixation des tissus, nettoyage). L'échantillon est ensuite placé sur la chambre-objet. Enfin des détecteurs d'électrons secondaires et rétrodiffusés disposés cette fois-ci dans la chambre objet, viennent parfaire les capacités d'observation du microscope [55]. Le système ainsi **couplé** au système de microanalyse, permet la caractérisation des structures cristallines en présences dans le matériau. Les systèmes sont pilotés par logiciel sous le système d'exploitation Windows 7.



Figure 2.11 : Préparation des échantillons
(Fixation des tissus, nettoyage)

Chapitre.3

MODELISATION ET SIMULATION THERMIQUE DU SOUDAGE BOUT A BOUT DES TUBES EN HDPE

3.1 Introduction au transfert thermique :

Le transfert thermique est un processus complexe qui est réalisé par la superposition des trois modes fondamentaux : conduction, convection et rayonnement. Dans le cas où l'un de ces trois modes est déterminant, les effets des autres sont peu importants ; aussi ils peuvent être négligés, simplifiant considérablement l'analyse du cas concerné. En tenant compte de ces conditions, pour notre étude on présente le mécanisme d'apparition de chacun de ces modes au sein de l'opération de soudage bout à bout du tube en HDPE dont le but est dévalué le champ de température dans la zone affectée thermiquement. Le soudage bout à bout est une technique d'assemblage des thermoplastiques par la fusion des extrémités des deux tubes au moyen d'une plaque chauffante. Au cours de ce procédé, les deux tubes sont chauffés au moyen d'une plaque chauffante à une température comprise entre (180 et 230 °C). Réellement le procédé se déroulera par les trois modes de transfert thermique, mais il est plutôt prépondérant par le transfert par conduction, puis par convection. Le rayonnement en proportion reste en dessous du ratio d'influence, de ce fait ce mode peut être négligé, c'est la décision prise dans la littérature de l'ensemble des travaux de recherche du soudage bout-à-bout [15,45,56]

3.2 Modèle thermique :

3.2.1 Mise en équations :

Le tube à souder se comportent comme un milieu semi infini suivant la direction z, le modèle mathématique suppose un plan de symétrie qui divise la plaque chauffante en deux, chaque moitié chauffe un tube (figure 3.1), et il suppose aussi l'axi-symétrie dans les tubes qui subissent une charge thermique identique.

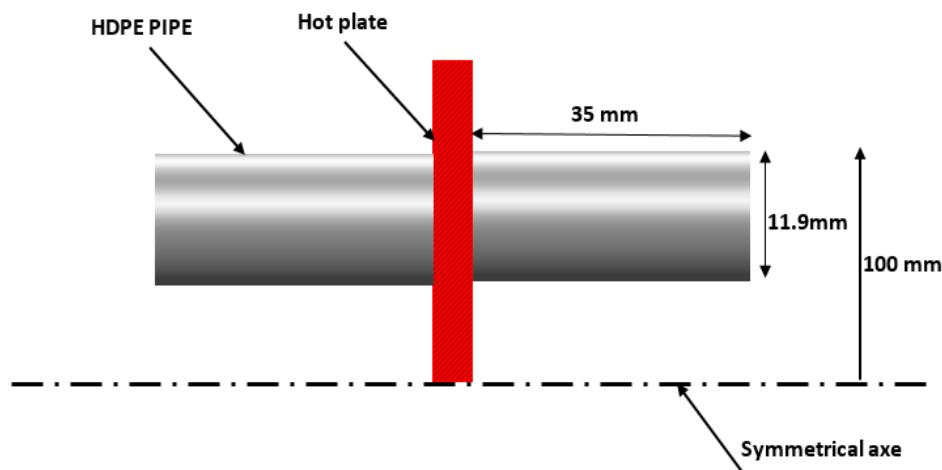


Figure. 3.1 : Présentation en 2.D des tubes à souder avec la plaque chauffante

Si bien que la détermination de la variation de la température en fonction du temps dans les deux directions axiales et radiales (r et z) est régie par l'équation de chaleur en coordonnées cylindrique (3.1).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \lambda_z \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

Où :

T : température du tube (k) ;

r : rayon du tube (m) ;

z : longueur du tube(m) ;

ρ : masse volumique (kg/m3) ;

c : chaleur spécifique (J/Kg/K);

λ_r et λ_z : les conductivités thermiques axiale et radiales (w/m K) ont été considéré constante,

3.2.2 Condition initiale :

Le champ de température initiale dans toute la paroi du tube sera pris égale à la température ambiante ($T_0 \approx 25^\circ\text{C}$).

$$\text{à } t = 0, r_i \leq r \leq r_e, z \geq 0: T(r, z, 0) = T_0 \quad (3.2)$$

3.2.3 Condition aux limites :

Pour les conditions aux limites on a utilisé celle de la littérature [45] en tenant compte des deux mode conduction et convection, en rajoutant le flux convectif dans les quatre phases (égalisation, chauffage, retrait de la plaque, soudage et refroidissement) et on néglige le mode de rayonnement. La température de la plaque chauffante est introduite par la condition de "Dirichlet" : température imposée à l'extrémité du tube ($T_p = 220^\circ\text{C}$) et la température initiale est de ($T_0 = 23^\circ\text{C}$). Le flux convectif est introduit depuis la première seconde de la phase d'égalisation et reste jusqu'à la dernière phase ont utilisant la condition de "Neumann" qui nécessite à imposer une température et un coefficient d'échange entre le tube et l'air environnant [58]. Le coefficient de convection est considéré uniforme sur toute la surface du tube. Le mode de rayonnement a été négligée. Les conditions aux limites régissant le transfert thermique au niveau des quatre phases du procédé de soudage b-à-b sont :

3.2.3.1 Phase d'égalisation et de chauffage :

Dans ces deux phases la plaque chauffante est en contact avec les bouts du tube à souder avec une température ($T_p = 220^\circ\text{C}$),

3.2.3.1.1 Phase d'égalisation :

Cette phase a pour but de s'assurer que la totalité de la surface du tube est en contact avec le miroir chauffant. Cette étape dure $t_{eg}=22$ secondes, le temps qu'une fine couche de polymère puisse fondre. Le matériau mis en contact présente une résistance thermique de contact très faible devant la résistance de la paroi cela est due à la conductivité thermique du polyéthylène

qui est très faible, de ce fait le transfert de chaleur sera gouvernée uniquement par les résistances des parois, ainsi la résistance de contact à l'interface sera négligée.

3.2.3.1.2 Phase de chauffage :

Les deux tubes sont laissés en contact avec le miroir à la même température $T_p = 220^\circ\text{C}$ mais avec une pression très faible de l'ordre de 0,01 MPa pour une durée $t_{ch} = 200$ s, afin d'élargir la couche de polymère fondu qui est nécessaire au soudage. A l'interface la résistance thermique sera négligée par rapport à celle des parois, à cause de la faible conductibilité des polyéthylènes. Les conditions aux limites de ces deux phases sont présentées dans les équations (3.3), (3.4) et (3.5) :

à $0 < t < t_{eg}$ et $t_{eg} < t < t_{ch}$:

$$r_i < r < r_e, z = 0 : T(r, 0, t) = T_p \quad (3.3)$$

$$r = r_i, z \geq 0 ; \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{h}{\lambda} (T - T_a) \quad (3.4)$$

$$r = r_e, z \geq 0 ; \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{h}{\lambda} (T_a - T) \quad (3.5)$$

3.2.3.2 Phase de retrait de la plaque :

La plaque chauffante est retirée durant cette phase, les deux surfaces des extrémités du tube à souder sont en contact avec l'air ambiant, ainsi le transfert de chaleur dans cette zone sera de type convectif et donc l'équation (3.3) est remplacée par la condition aux limites (3.6), les surfaces latérales internes et externes du tube restent en contact avec l'air environnant condition (3.4) et (3.5) mais avec une durée relativement court $t_{retrait} = 10\text{s}$.

$$\text{Pour } t_h < t < t_{retrait} ; r_i < r < r_e, z = 0 ; \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{h}{\lambda} (T - T_a) \quad (3.6)$$

3.2.3.3 Phase de soudage et refroidissement :

C'est la dernière phase durant laquelle la soudure se solidifiée et le refroidissement reste à l'air libre pendant une durée $t_{soud-refoi} \geq 600$ s. Les conditions aux limites (3.4) et (3.5) sont toujours présent mais les équations (3-6) devraient remplacer par l'équation (3-7) :

$$\text{à } t > t_{soud-refoi} ; r_i < r < r_e, z = 0 ; \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

3.3 Discréétisation par la méthode de la direction alternée implicite :

La méthode de la direction alternée implicite est un algorithme implicite inconditionnellement stable qui conduit à des systèmes d'équations tri-diagonales [58,59]. Dans cette méthode, l'incrément de temps donné est divisé en deux étapes de temps et à chaque pas de temps, la

méthode implicite est utilisée dans une seule direction tandis que l'autre direction est traitée explicitement. Le schéma ADI est présenté dans la figure 3.2

Le profil radial est divisé en 30 éléments appelé « n_r » avec un pas d'espace Δr , et le profil axial est divisé en 90 éléments appelé « n_z » avec un pas d'espace Δz . n_r correspond à une épaisseur de 11mm et n_z correspond à une longueur z de 25mm.

Les coordonnées $T(r, z, t)$ sont remplacées par:

$$t = k \cdot dt$$

$$r = i \cdot \Delta r;$$

$$z = j \cdot \Delta z;$$

Ou : $T(i\Delta r, j\Delta z, kdt) = T_{(i,j)}^k$ présente la température dans les position et le temps discrétisé:

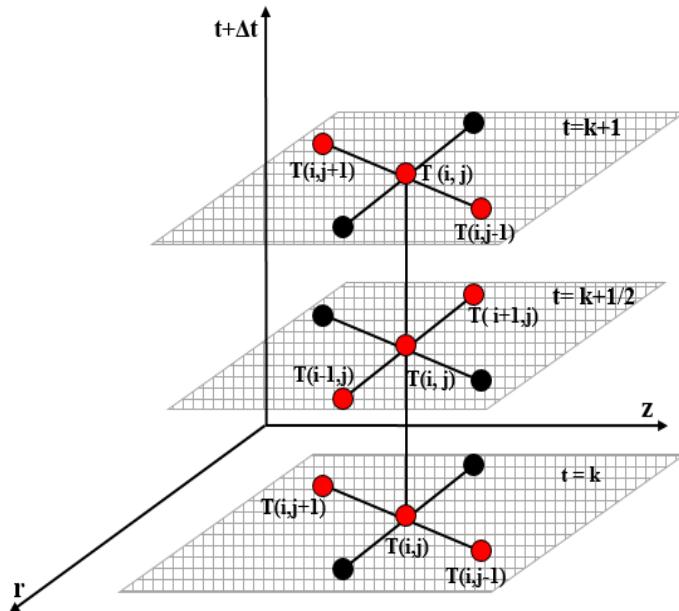


Figure.3.2 Schéma numérique « ADI »

L'équation (3.1) est résolue numériquement par la méthode des différences finies, schéma de la direction alternée implicite. La discrétisation est donc divisée en deux étapes prédition et correction, elle peut être exprimée mathématiquement en utilisant l'expression suivante :

Etape.1 (Prédiction)

r : Direction implicite et z : Direction explicite

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{(i,j)}^{k+1/2} - T_{(i,j)}^k}{\frac{\Delta t}{2}}, \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{i\Delta r} \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)}, \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2}; \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{(i+1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i-1,j)}^k}{\Delta z^2} \quad (3.11)$$

En remplace les différents termes des équations (3.8), (3.9), (3.10) et (3.11) dans l'équation (3-1) on obtient :

$$\frac{T_{(i,j)}^{k+1/2} - T_{(i,j)}^k}{\frac{\Delta t}{2}} = a_r \left(\frac{1}{i\Delta r} \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)} + \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2} \right) + a_z \left(\frac{T_{(i+1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i-1,j)}^k}{\Delta z^2} \right) \quad (3.12)$$

Etape.2 (Correction) :

r : Direction explicite et **z** : Direction implicite

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{(i,j)}^{k+1} - T_{(i,j)}^{k+1/2}}{\frac{\Delta t}{2}}, \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{i\Delta r} \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)}, \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2}; \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i-1,j)}^{k+1}}{\Delta z^2} \quad (3.16)$$

La même chose comme l'étape (1) En regroupent les différents termes des équations (3.13), (3.14), (3.15) et (3.16) on obtient :

$$\frac{T_{(i,j)}^{k+1} - T_{(i,j)}^{k+1/2}}{\frac{\Delta t}{2}} = a_r \left(\frac{1}{i\Delta r} \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)} + \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2} \right) + a_z \left(\frac{T_{(i+1,j)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i-1,j)}^{k+1}}{\Delta z^2} \right) \quad (3.17)$$

Dans notre code MATLAB nous avons ajouté quelques-unes des constantes pour faire le schéma plus lisible, compréhensible et plus facile à programmer (pour plus de détail voir annexe n°1). La méthode ADI produit un ensemble d'équations tri-diagonale à la $(k + 1/2)$ niveau. Les équations peuvent être résolues au long de toutes les lignes de la grille, une ligne à la fois. Une fois, tous les nœuds ont été élevés à la $(k + 1/2)$ niveau, une procédure similaire pour la colonne des nœuds est appliquée. Une itération en deux étapes est achevée lorsque les nouvelles valeurs sont calculées [58]. Une fois la discréttisation terminée les équations ainsi développées est implantée sous Matlab pour simuler l'évolution du champ de température dans les quatre phases de l'opération de soudage.

3.4 Résultats et discussion :

3.4.1 Champs de température dans la direction radiale :

On présente dans la figure 3.3 les champs de température, pour les quatre phases de chauffage, dans l'épaisseur du tube pour $r_i < e < r_e$, et pour une profondeur $z=1\text{mm}$ à partir de la plaque chauffante.

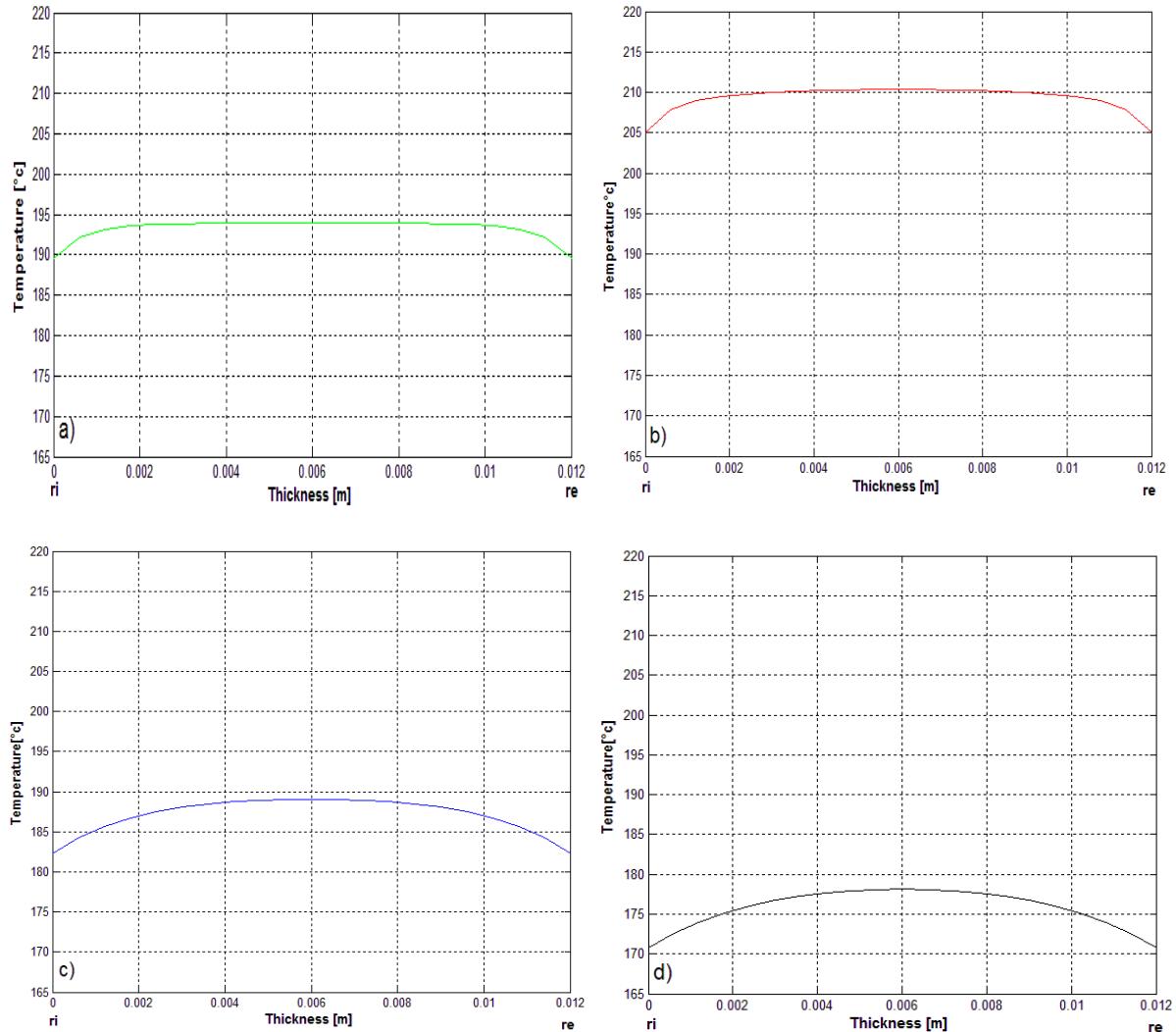


Figure.3.3 : Champs de température dans l'épaisseur radiale du tube $T=f(e)$ pour une profondeur ($z=1\text{mm}$) de la plaque chauffante pour les 4 phases :

a) égalisation ; b) chauffage ; c) retrait de la plaque ; d) Soudage et refroidissement)

On trouve les champs de température des phases d'égalisation et de chauffage respectivement dans les figures 3.3.a, et 3.3.b. Un maximum de 194°C est atteint dans la première phase. Pour la deuxième phase le maximum est de 210°C. La valeur maximale de température reste constante dans l'épaisseur du tube jusqu'à 2 mm de part et d'autre des extrémités. Dans les bords de ces extrémités l'effet de la convection avec l'air ambiant est observé. Ainsi la température sous l'effet de la convection subira une diminution de 5°C.

Dans la figure 3.3.c on présente le champ de température dans la phase de retrait de la plaque chauffante. On constate que l'effet de la convection avec l'air environnant et ressenti le long de l'épaisseur. De ce fait l'évolution du champ de température prend une forme parabolique, ainsi la température évoluera d'un extrémum de 188 °C à un minimum de 182°C. La phase de soudage et refroidissement est présentée dans la figure 3.3.d, l'effet de la convection est toujours observé, ainsi le champ de température prend une forme parabolique avec une température au sommet de 178°C et aux extrémités de 172°C.

3.4.2 Champs de température dans la direction axiale :

Le résultat de la distribution de la température dans la profondeur du tube au milieu de son épaisseur, pour les quatre phases, est présenté dans la figure 3.4 Dans cette zone de profondeur, le champ de température est très influencé.

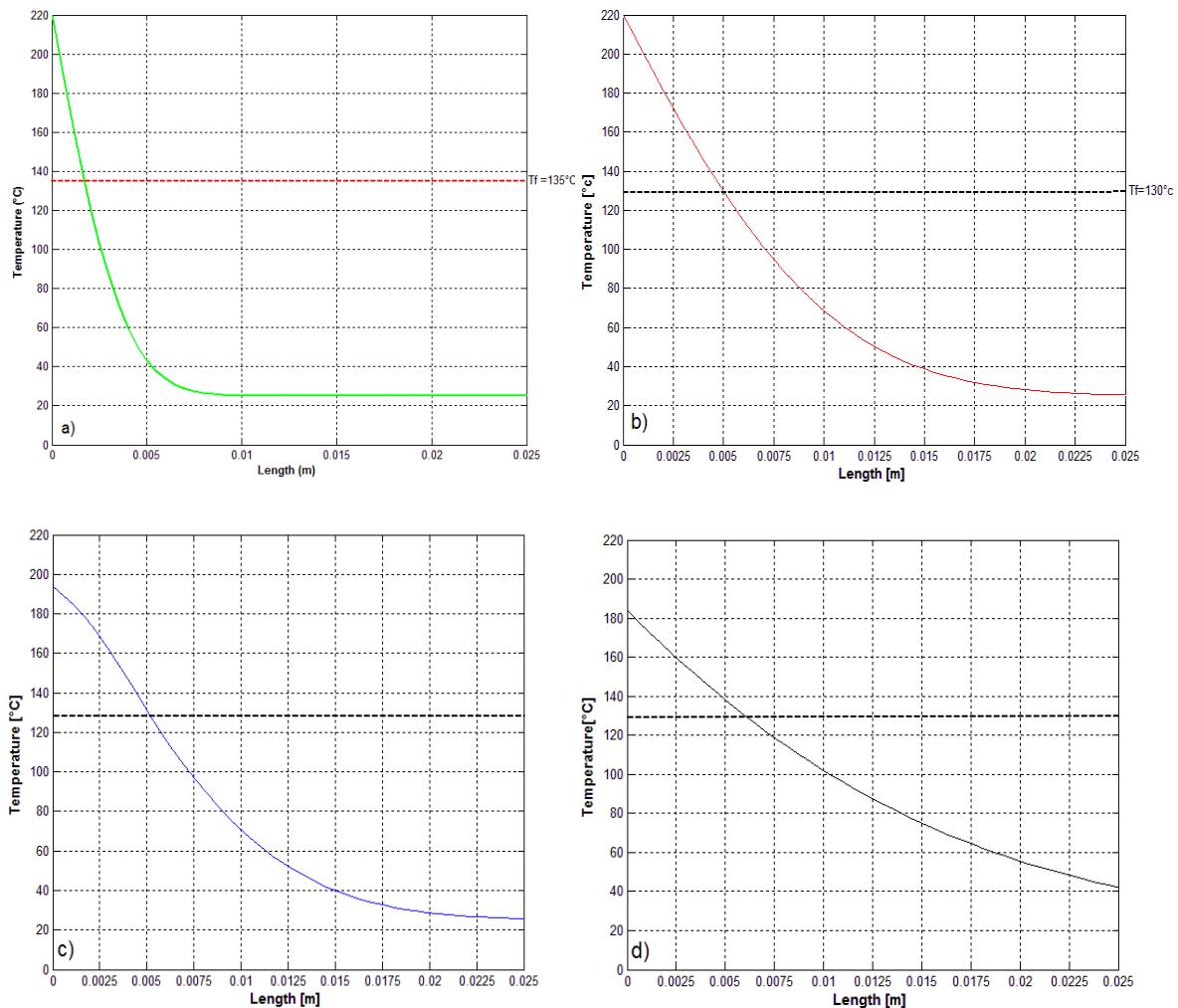


Figure. 3.4: Champs de température suivant la longueur $T=f(z)$ à une distance du centre de l'épaisseur $r_i+(r_e-r_i/2)$ pour les quatre phases : a) égalisation, b) chauffage c) retrait de la plaque et d) soudage et refroidissement)

La température de fusion sera atteinte à une profondeur de 5mm. Dans la phase de retrait de la plaque chauffante, figure 3.4.c, un transfert convectif entre les deux extrémités du tube à souder et l'air ambiant est créé. Ce qui engendrera une diminution de la température dans la direction axiale de l'ordre de 27°C à l'interface, par contre l'effet de l'inertie thermique de la haute température de la plaque 220°C fait augmenter légèrement le champ surtout dans la partie fusionnée. Dans la phase de soudage et refroidissement, figure 3.4.d, qui se déroule en 600 s, on constate que la température de fusion atteint une profondeur de 7.5 mm et la distribution de la température devient monotone décroissante jusqu'à atteindre 40°C à 25 mm de profondeur.

3.4.3 Evolution de la température dans le temps :

Dans la figure 3.5 on présente, pour les quatres phases de soudage, l'évolution de la température à l'interface miroir-tube.

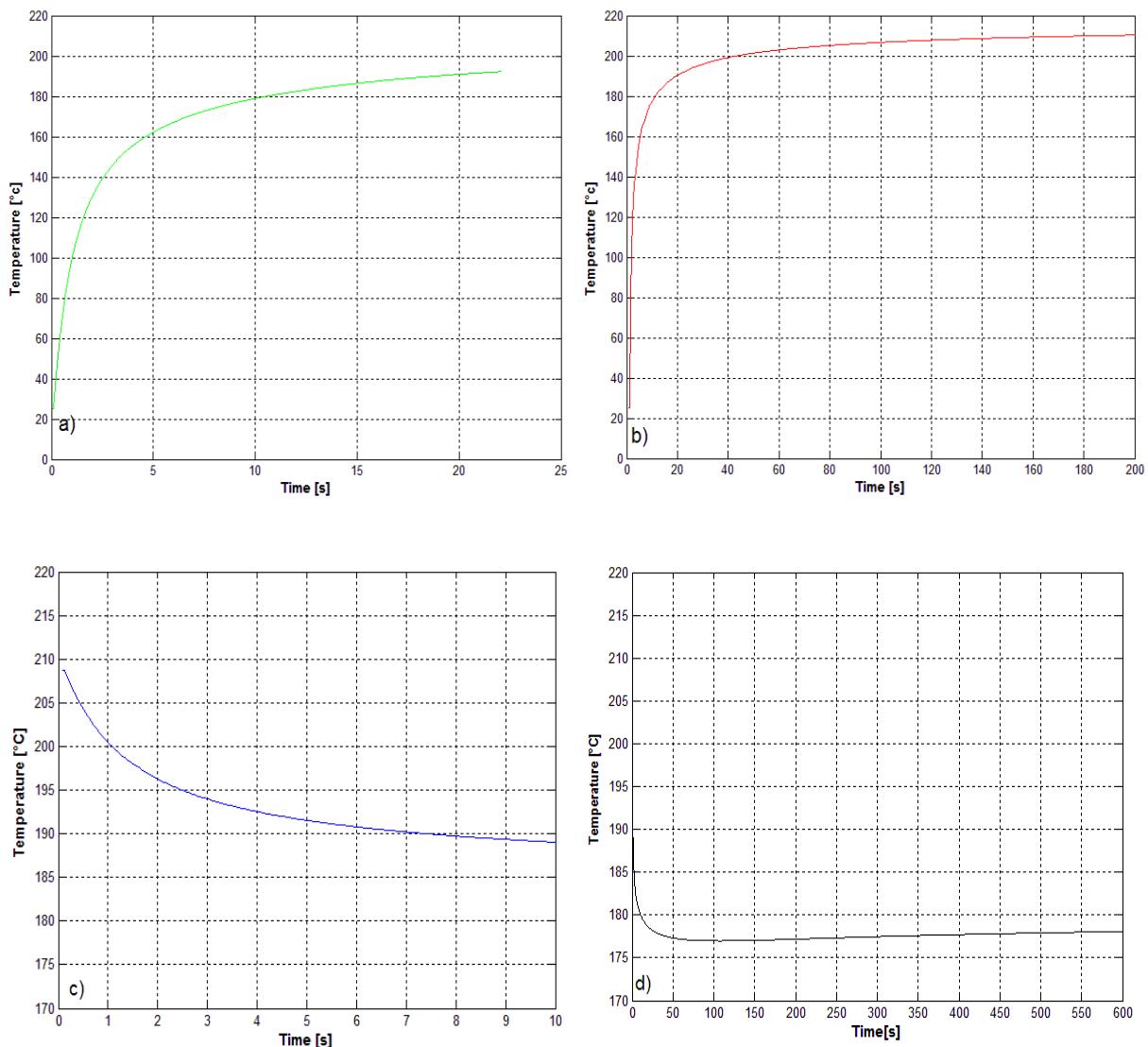


Figure.3.5 : Evolution de la température dans le temps à une distance de 1 mm au centre de la paroi par rapport à l'interface de contact des deux tubes pour les quatre phases :
a) égalisation a 22 s, b) chauffage a 200s c) retrait de la plaque pendant 10s et d) soudage et refroidissement a 600s

La phase d'égalisation se déroule en 22 s figure 3.5.a, la température 180 °C sera atteinte en 10 s. La phase de chauffage se déroule de 23s à 200s, la tempéraure à la fin de cette phase atteint 210 °C, la figure 3.5.b regroupe ces deux derniere phases. La phase de retrait du miroir, qui se situe entre le chauffage et le soudage, se traduit par une stabilisation, voire une diminution, de la température. La matière étant en contact avec l'air, arrête de chauffer et commence à se refroidir. elle dure 10 s figure 3.5.c, l'évolution de la température est monotone décroissante atteignant 189 °C à la fin de la phase. Dans la figure 3.5.d on présente la phase de soudage et refroidissement, sa durée est 600 s, l'évolurion de la température est monotone décroissante de 189°C à 176°C puis une légère augmentation est observé dû principalement à l'inertie thermique.

3.4.4 Visualisation du champ de température en 3D :

Dans la figure 3.6 on présente dans l'espace l'évolution de la température dans les deux directions axiale et radiale, on trouve les quatre phases

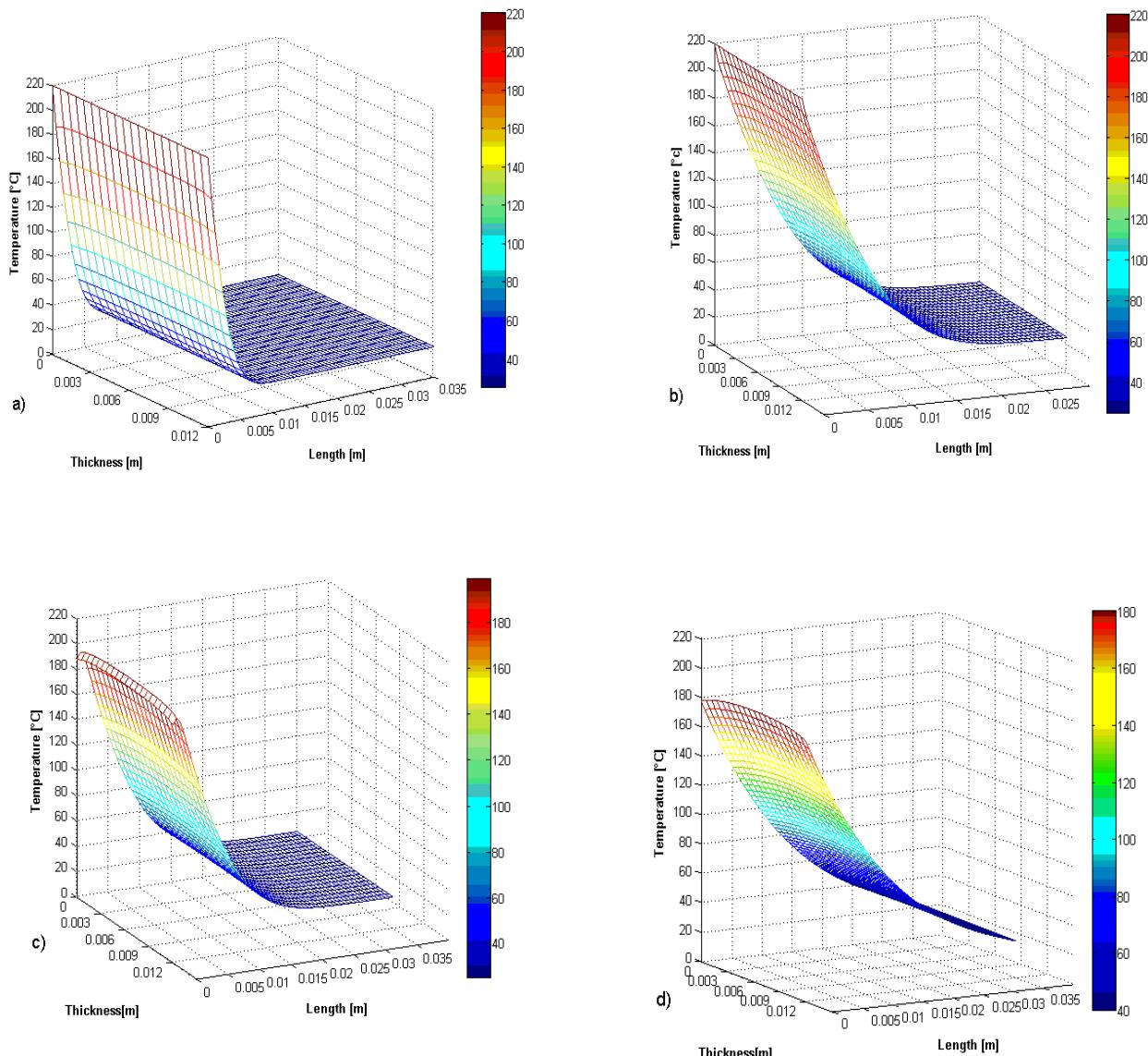


Figure 3.6 : Visualisation du champ de température en 3-D, $T=f(r, z)$ pour la fin de chaque phase : a) égalisation, b) chauffage, c) retrait de la plaque et d) soudage et refroidissement)

La figure 3.6.a se concerne la phase d'égalisation, dans la figure 3.6.b on trouve la phase de chauffage, la figure 3.6.c illustre la phase de retrait de la plaque, et dans la dernière courbe on retrouve la phase de soudage et refroidissement. Ainsi l'effet de chauffage est observé dans la partie axiale du tube (profondeur) dans une plage de 0,005 à 0,035 mm selon la phase.

3.5 Validation des résultats :

Dans la figure 3.7 on trouve la Validation du modèle à partir du résultat expérimental de M.O. HEHN [15]. Cette validation est obtenue à partir de l'évolution de la température à l'interface miroir-tube pour les deux première phases de soudage. Les deux courbes se concordent avec un léger décalage surtout pendant la phase de chauffage où la courbe de HENN prend le dessus sur celle de notre modèle, cela est justifié par le fait que dans notre modèle on considère que la température de l'air à l'intérieur du tube reste constante égale à la température ambiante, cependant expérimentalement cet air subira des perturbations climatiques dû à son emprisonnement.

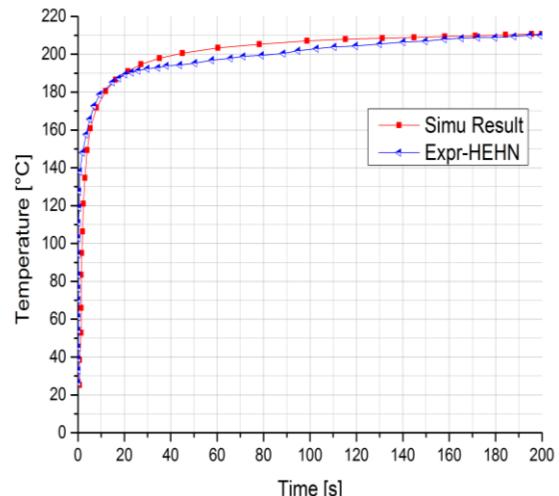


Figure 3.7 Validation du modèle à partir du résultat expérimental de M.O. HEHN

[15]

Sur la figure 3.8 on représente une comparaison de l'évolution de la température pour une profondeur de 25 mm entre notre modèle et celle de Shaheer et all [27]. Les résultats de Shaheer et all sont obtenus à partir du simulateur abaqus. On constate que les deux courbes concordent avec un léger décalage, celle de Shaheer prend légèrement le dessus. Ce décalage est dû à la non considération de l'effet de convection dans l'étude de Shaheer. De ce fait les tubes seront légèrement plus chauffés que ceux de notre modèle.

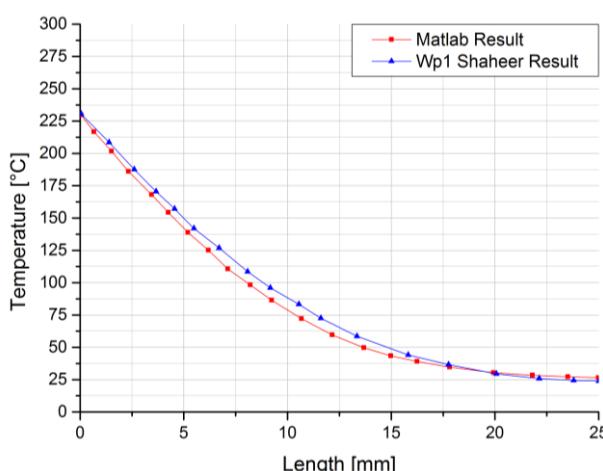


Figure.3.8 : Validation du modèle à partir du résultat obtenu par FEA-Abaqus de Shaheer et all.

Chapitre.4

DEVELOPPEMENT DE LA METHODE D'ACCES AUX COUCHES DU TUBE

4.1 Introduction :

Le but de ce chapitre est d'établir une méthode expérimentale basée sur l'usinage afin d'obtenir des propriétés mécaniques localisées dans la soudure par fusion b-à-b des tubes en polyéthylène. Cette méthode nous a permis de traiter deux aspects : (i) l'évolution des propriétés mécaniques à travers la soudure, c'est-à-dire à travers la paroi du tube (direction radiale) et (ii) la variation des propriétés mécaniques autour de la circonférence du tube (direction circonférentielle). La méthode est divisée en cinq phases distinctes : i) préparation des tubes, ii) soudage, iii) usinage, iv) découpage des spécimens, v) essais. Elle est utilisée aussi pour examiner l'interface de la soudure en recherchant les faiblesses de la soudure et pour établir une relation avec le matériau de base du tube non soudées.

4.2 La raison : pourquoi cette méthode ? :

La raison principale conduisant à proposer cette méthode est basée sur les analyses montrant le contour d'une soudure par fusion b-à-b telle qu'elle apparaît à partir d'une coupe longitudinale du tube comme indiqué sur la figure 4.1 [27, 60, 61]. La méthode est utilisée pour examiner l'interface de la soudure en recherchant les zones les plus faibles et pour établir une relation avec le matériau de base du tube non soudées. La forme de la soudure est spécifique à cette technique de jonction et on peut déduire que les propriétés à travers l'épaisseur du tube ne sont pas homogènes puisque la zone de fusion n'a pas d'interface homogène, c'est-à-dire qu'elle est pressée et réduite au centre et élargie aux frontières (surfaces intérieures et extérieures).

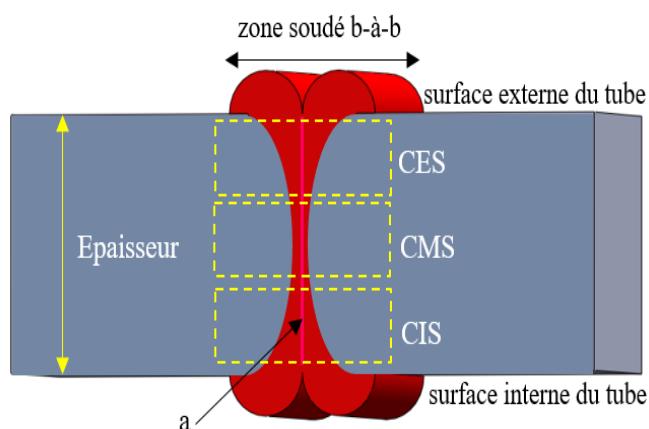


Figure 4.1 : Coupe longitudinale d'une soudure b-à-b le long de l'épaisseur du tube montrant les trois couches où les échantillons soudés sont extraits (CES, CMS, CIS). Flèche (a) indique le plan médian de la soudure où la cristallinité est la plus élevée

Afin d'enquêter sur ces hétérogénéités dans la relation propriétés mécaniques- structures du tube, il est obligatoire d'explorer comment accéder aux propriétés localisées à l'intérieur de la paroi du tube. Pour répondre aux exigences standards nécessaires aux essais mécaniques, les dimensions appropriées doivent être respectées.

4.3 Norme et dimension :

La figure 4.2 résume les dimensions standard disponibles pour les essais des résistances mécaniques sous traction et indique que l'éprouvette de type IV est la seule solution pour extraire trois couches successives à travers l'épaisseur de la paroi du tube. La méthode expérimentale proposée est en fonction de plusieurs facteurs permettant l'accessibilité à différentes propriétés dans la zone de soudure, elle consiste à fabriquer des spécimens permettant l'obtention des propriétés mécaniques à différentes profondeurs à l'intérieur de la paroi du tube tel que présenté dans les figures 4.1 et 4.2.

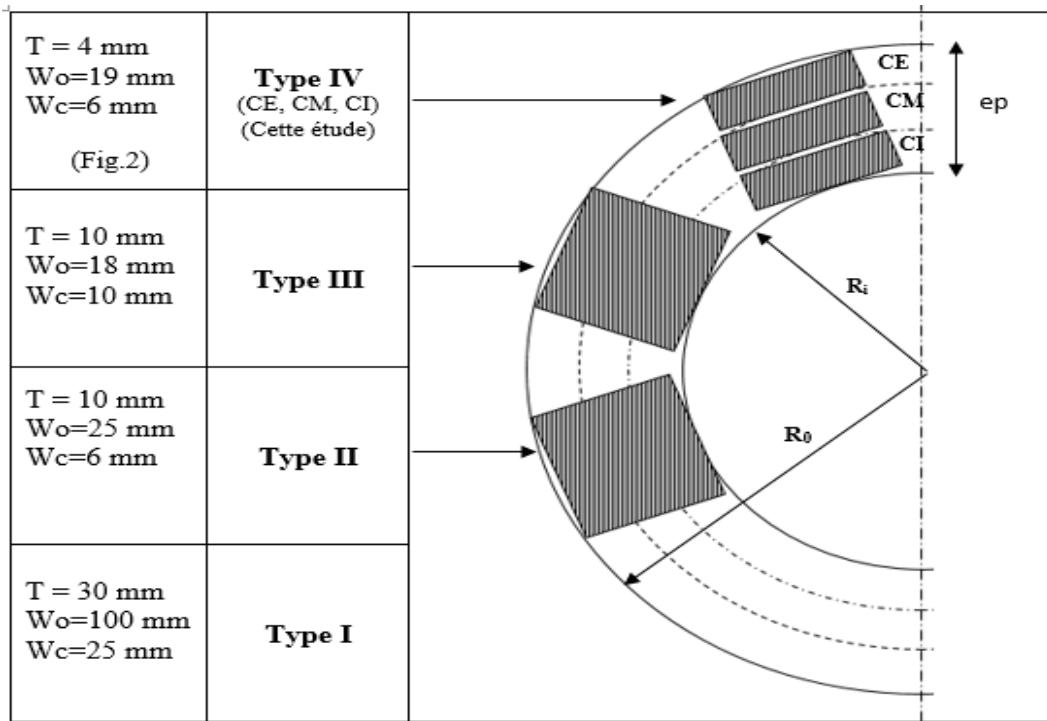


Figure 4.2 : Echantillon d'essai standard type IV en tant que solution pour la fabrication de trois échantillons identiques (CI, CM et CE) extraits de l'épaisseur du tube.

Les normes courantes des tests des échantillons du tube avec des épaisseurs importantes et des diamètres extérieurs élevés donnent des limitations importantes [16]. Par exemple, l'épaisseur minimum d'un tube de diamètre extérieur 2000 mm ne devrait pas être inférieure à 48.8 mm qui est loin du 4 mm demandé pour un échantillon du type IV [14]. Les dimensions de cette norme bien qu'elles soient acceptées pour les tubes non soudés, mais une fois que le matériau à contrôler contient une soudure par fusion bout à bout, l'approche globale va finalement cacher les observations visuelles qui sont nécessaires pour l'évaluation de la performance des soudures. Enfin, les normes actuelles ne mentionnent aucun indice sur l'emplacement de l'échantillon testé puisqu'il est supposé que les propriétés mesurées soient indépendantes des positions radiales. La présente méthode devient intéressante car elle fournit des alternatives aux limitations précédentes ; c'est-à-dire, obtenir une idée sur les propriétés locales dans la soudure à de nombreuses positions : le long de la circonférence du tube et pour les trois couches radiales (interne, moyenne et externe). Au moyen de l'usinage, ces couches

ont été obtenues sous forme de trois éprouvettes provenant du même tube à condition de ne pas perdre de matériau aux interfaces [32,35].

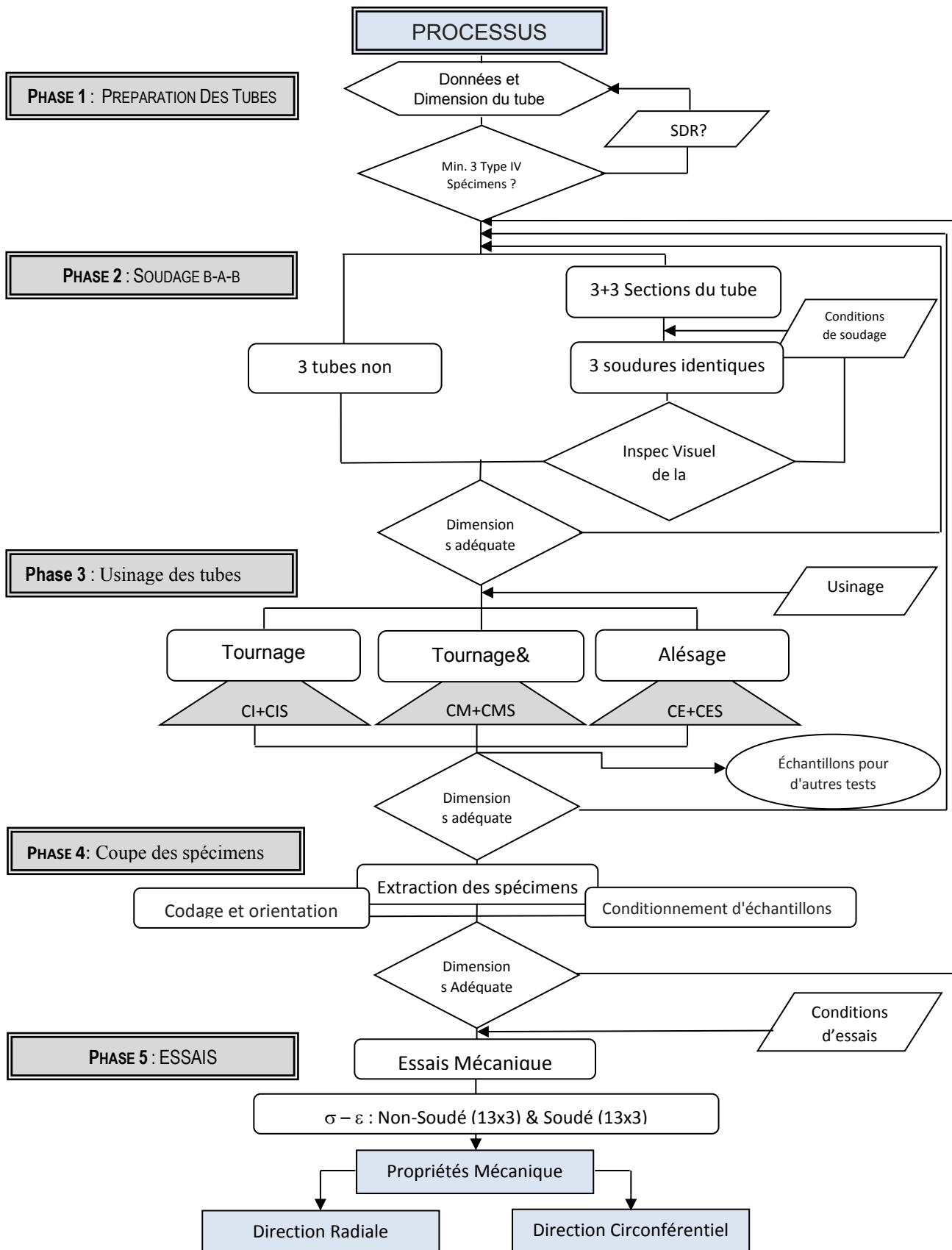


Figure 4.3: Processus de la méthode d'évaluation des propriétés mécaniques et ses phases de fabrication

4.4 Présentation de la méthode :

La méthode expérimentale développé au cours de notre étude est basée sur l'usinage du tube en HDPE (tournage et alésage), les cinq phases des procédés de fabrication sont présentées respectivement dans l'organigramme de la figure 4.3. La méthode nécessite de travailler sur des tubes en HDPE qui permet d'obtenir au moins trois spécimens standard adjacents de type IV de la paroi du tube comme indiqué précédemment dans la figure 4.1.

4.4.1 Phase de préparation des tubes :

C'est la 1^{ère} phase de la méthode développée, elle traite l'état et les dimensions des tubes soudés et non soudés tel que l'état de surface, le diamètre, la longueur, l'épaisseur afin d'obtenir trois éprouvettes standard de type IV dans chaque lot (soudé et non soudés), elle est régie par le rapport de dimension standard (SDR) qui est défini par les fabricants des tubes thermoplastiques selon la relation suivante :

$$\text{SDR} = D_e / e_{\min} \quad (4.1)$$

Avec : D_e : diamètre extérieur (mm) et e_{\min} : épaisseur minimum (mm).

Les diamètres extérieurs standards du tube en HDPE vont de 16 à 2000 mm, ce qui correspond aux valeurs SDR de 6 à 41 [17]. En fait, un minimum de trois spécimens est essentiel pour construire une tendance dans la direction radiale puisque les effets de l'hétérogénéité sur la résistance de la soudure peuvent de ne pas être sévère le long de la circonférence par rapport à la direction radiale où l'initiation et la propagation de la fissure sont les plus probables. Par conséquent, le plan consiste à discerner au moins trois surfaces contiguës désignées dans cette étude par CIS, CMS et CES (figure 4.1) et indiqué dans la deuxième et la troisième phase (figure 4.3 et tableau 4.2). Cela signifie que les conditions d'usinage sont très critiques pour telles études car un choix de paramètres de coupe injustifiés influencera les résultats des mesures. Par conséquent, un régime de coupe adapté est supposé empêcher une déformation plus importante du matériau et devrait réduire la production de chaleur afin de préserver la structure d'origine [10, 11].

4.4.2 Phase de soudage b-à-b :

Les surfaces de soudage sont préparées conformément aux normes standards pour assurer une jonction complète et correcte. Habituellement, ces paramètres sont fournis par les fabricants sur une carte magnétique pour chaque lot (type de PE, D_e , e , et SDR). Dans cette phase six tronçon de tube en HDPE de 200 mm de diamètre et de 11.9mm d'épaisseur ont été soudés les uns aux autres dans le but d'obtenir 3 jonction identique. Les soudures ont été contrôlé avec une inspection visuelle des bourrelets interne et externe. Le travail expérimental consiste à préparer à partir de la même section du tube, trois joints de soudure bout à bout identiques, soudé dans les mêmes conditions de pression et de température. Les coupes des tubes et les soudures sont effectuées dans le même lot du tube pour garder l'orientation initiale du tube tel qu'il a été fabriqué et pour minimiser les dommages induits dus à la manipulation des opérations (figure 2.1).

En général, 3 éléments contribuent à obtenir une soudure bout-à-bout acceptable : (i) propreté des surfaces du joints (enlèvement de tout contaminant, selon la procédure), (ii) une formation technique adaptée et qualifiée pour le manipulateur et enfin (iii) un équipement de soudage correctement dimensionné et contrôlé par ses propres opérations de maintenance durant le service (selon les procédures) [16, 18]. Ces opérations permettent d'éviter des défaillances dès les premiers temps de la soudure. Grâce à ce système, une soudure homogène basée sur la fusion de la matière seulement (sans apport additionnel de matière) est présumée obtenue mais ce n'est toujours pas le cas (Figures 4.4a, b et c).

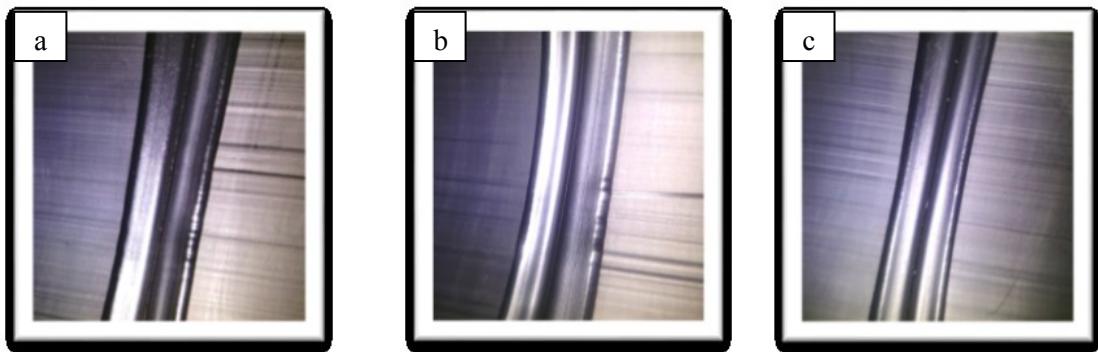


Figure 4.4a, b et c : Vues proches de bourrelets de matière fondue dans 3 différentes soudures montrant quelques variances admises (a), (b) et (c).

4.4.3 Phase d'usinage :

Après l'opération de soudage les échantillons soudés et non soudés ont été usiné sur une machine de tour TOS TENCIN, les opérations sont : tournage pour la couche interne du tube, tournage et alésage pour la couche moyenne et alésage seule pour la couche externe. L'objectif est de fabriquer trois enveloppes de tube représentant les sections non soudées pour les couches extérieure, moyenne et intérieure désignées par CENS, CMNS et CINS et qui sont considérées comme des références pour les propriétés mécaniques.

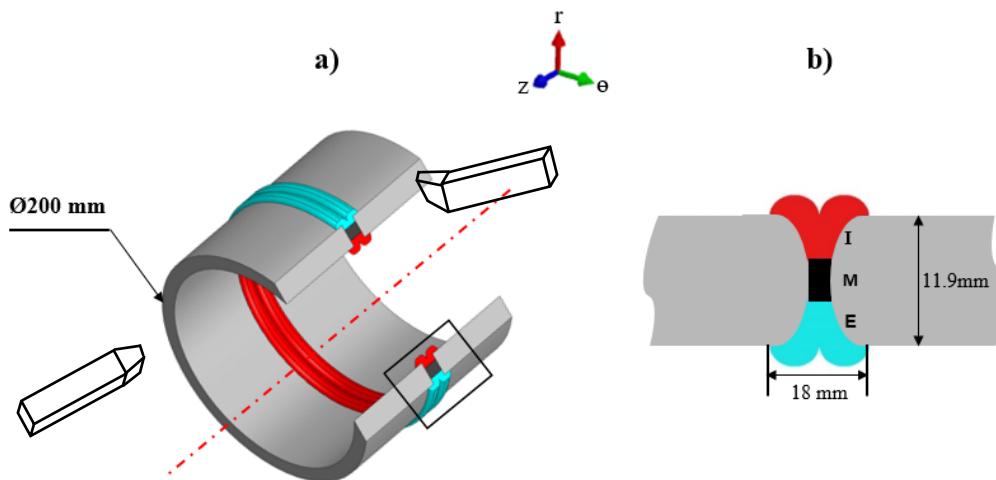


Figure 4.5: Schéma de la soudure à travers la paroi du tube en HDPE; b) Identification des couches soudées (I) intérieur, (M) moyenne, et (E) extérieur (CIS, CMS et CES)

De même, les tubes soudés sont utilisés pour fabriquer trois enveloppes équivalentes contenant une partie spécifiée de la totalité de la soudure comme illustré sur la figure 4.5 (direction radiale). Ces derniers sont désignés par CES, CMS et CIS et ont des positions semblables comme CENS, CMNS et CINS, respectivement. Les détails des dimensions des enveloppes après usinage sont indiqués dans le tableau 4.1. A la fin de cette phase, les échantillons du tube en PE soudé et non soudé ont été correctement identifiés (θ et r) et peuvent être pris pour des caractérisations structurelles ou autres essais telles que des mesures de cristallinité ou de micro-indentation [27,35, 60, 62].

Tube HDPE-100 (SDR 17.6)	Dimension originale du tube	Dimensions après usinages					
		Couche Externe (CE)		Couche moyenne (CM)		Couche interne (CI)	
		CENS	CES	CMNS	CMS	CINS	CIS
		1	2	3	4	5	6
<i>De (mm)</i>	200	200		192		184	
<i>Di (mm)</i>	176.2	192.2		184.2		176.2	
<i>rayon extérieur min (mm)</i>		100		96		92	
<i>Nbre des spécimens (Type IV)</i>		13	13	13	13	13	13
<i>e_{min} (mm)</i>	11.9	3,98 ±0,17	3.98 ± 0,15	3,91 ±0,1	3.93 ±0,15	3.87 ±0,15	3.96 ±0,11

Tableau 4.1 : Dimensions des tubes après usinage des couches intérieure, moyenne et extérieure pour les tronçons soudés et non soudés e_{\min} (après-usinage) ≤ 4 mm

4.4.4 Phase de préparation et découpage des éprouvettes d'essais :

Une fois les dimensions sont adéquates, l'extraction des échantillons d'essai est démarrée simultanément avec codification et conditionnement de tous les échantillons comme illustré dans la figure 4.6.

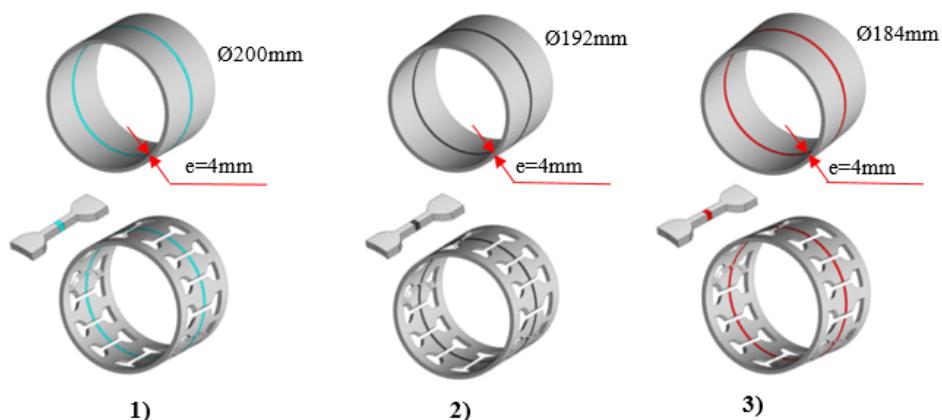


Figure 4.6 : Découpage des éprouvettes de traction *dans les trois couches*
(1) Couche interne, 2) couche moyenne et 3) couche externe

Il convient de noter que ces opérations sont effectuées au même temps pour les échantillons soudés et non soudés ont respectant la géométrie de l'éprouvette type IV de la norme ASTM D-638 [14].

Ces éprouvettes sont destiné pour l'essais de traction et peuvent être les utilisées aussi dans l'essais de micro-dureté. D'autre type d'éprouvettes de petite dimension sont prélevé aussi à partir des mêmes paroi (interne, moyenne et externe) pour les utilisés dans l'analyse enthalpique différentielle qui permis de déterminer la température de fusion, l'enthalpie de fusion et le taux de cristallinité du matériau en polyéthylène soudé et non soudé.

4.4. 5 : Phase d'essais mécaniques :

Les essais mécaniques effectués dans cette méthode sont : essais de traction, essais de Micro-dureté. Ils ont été effectués en fonction des normes et suivant des protocoles fournis dans la méthode.

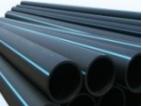
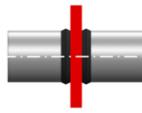
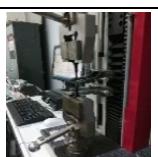
P H A S E	OPÉRATIONS DE FABRICATION	OPÉRATIONS SPÉCIFIQUES	CONCEPTION DES PRODUITS	CONDITIONS TECHNIQUES	NORMES	REF
1	Échantillonage du tube	Lots des tubes extrudés		HDPE, D _e ; SDR ; Spécimen : Type IV $e_{min} : N^o$. Spécimens ≥ 3 (Détail en Chapitre.2)	ASTM D-3035 EN 12201 NA 7700 : Algerian Std.	[16] [21]
2	Soudage du tube	3 joint soudé b-à-b		(Détail en Chapitre.2)	ISO-12176-3 ASTM F-2620 ASTM D-3261	[18][24]
3	Usinage du tube	(Étude précédente) Spécimens sous forme de filament Usinage orthogonal		Outil de coupe spécifique Régime spécifique : V_c ; a_p ; Pas d'avancé (f); Coupe par la paroi du tube	Pas de norme disponible	[34][50]
		Spécimens standard: Tournage + Alésage		Régime spécifique : V_c ; f , a_p ; Géométrie d'outil adaptée. (Détail en Chapitre.2)	ISO 2818 (1994)	[10] [11] [14] [61]
4	Extraction des éprouvettes	Presse mécanique. Anneaux fendus Directions : θ , r , z		$e_p \leq 4\text{mm}$; Type IV (Détail en Chapitre.2)	[32][35] [51]	
5	Essais	Universal Testing Machines de traction :		Vitesse d'essais (mm/min) $T^o = \text{ambient}$ Acquisition automatique de données (Détail en Chapitre.2)	ISO-527-1 ASTM D-638	[14][33] [42] [62]

Tableau 4.2 : Opérations de fabrication et conditions techniques de la méthode proposée

Afin d'accéder aux propriétés mécaniques dans chaque couche du tube on a utilisé la machine de traction de type Zwick Z010 (détail disponible dans le chapitre.2). L'utilisation de cette méthode nous a permis de dégager plus de 13 éprouvettes le long de la direction circonférentielle du tube pour trois positions dans la direction radiale (1. Interne, 2. moyenne et 3. externe), donc on a obtenu un nombre total de 78 spécimens avec et sans joint de soudure. Toutes ces éprouvettes ont été soumis à des essais de traction monotone.

Cet essai permis de contrôler la qualité de la soudure par rapport au matériau de base en polyéthylène de haute densité et aussi d'analyser l'évolution des propriétés mécaniques à travers la paroi soudé et non soudé. Les résultats de ces essais seront bien discutés dans le chapitre 5 et 6.

Les détails des cinq (05) phases sont illustrés dans le tableau 4.2 avec les différentes conditions et les normes appropriées qui ont guidés à la sélection des paramètres.

Chapitre.5

ANALYSE DES PROPRIETES DIMENSIONNELLES ET STRUCTURALES

5.1 Introduction :

La littérature disponible en relation avec la présente étude a traité le soudage par fusion bout à bout sous trois aspects complémentaires: (i) propriétés mécaniques associées à la microstructure des soudures recherchant des détails descriptifs et explicatifs [30, 48, 61], (ii) rechercher de nouvelles techniques de caractérisation notamment des méthodes CND pour analyser la zone de fusion et ses phases [36, 37, 38] et enfin (iii) la qualité de la soudure, analyse des défauts, fiabilité et durabilité à long terme [31, 42, 63]. Bien que de nombreux auteurs aient tenté d'établir des corrélations entre la structure et les propriétés mécaniques du PE semi-cristallin, les explications sous-jacentes ne sont pas bien comprises car la composition chimique du tube est constamment améliorée par des copolymérisations et de nouveaux additifs (stabilisants, antioxydants, pigments ...) sous la pression des industriels qui continuent à valider les produits nouvellement développés pour des besoins pratiques tels que les tubes à double paroi, les tubes ondulés et les tubes en plastique de grand diamètre [64]. Ce chapitre permis d'analyser et d'apprécier les caractéristiques dimensionnelles et structurales de la soudure bout à bout et les comparer avec celui du matériau de base en HDPE, on se basant sur des mesures expérimentales.

5.2 Analyse dimensionnelle :Mesure des bourrelets de soudure interne et externe :

L'allure des cordons de soudure formés au cours du procédé de soudage bout à bout joue un rôle très important dans l'analyse du procédé. En effet, les bourrelets sont les conséquences de l'ensemble des conditions aux limites imposées sur le tube (temps, température, pression...) La caractérisation visuelle des trois soudures obtenues montre quelque variance admise dans la géométrie du bourrelet de soudure, pour cela nous avons mesuré les dimensions interne et externe des trois bourrelets obtenus, la largeur (l) et la hauteur (h) représentées sur la figure 5.1.

Une série de mesures a été faite (tableau 5.1) dans le but de contrôler la variation de l'épaisseur du tube le long du périmètre à l'aide d'un pied à coulisse électronique (DIGITAL CALIPER 0-150mm). Les résultats sont illustrés dans les Figures 5.2 et 5.3.

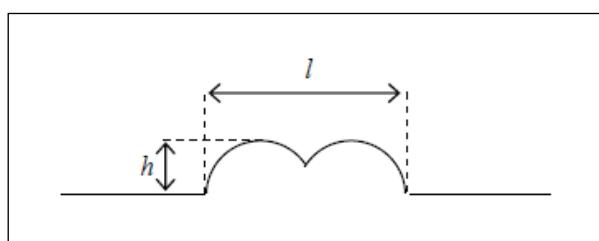


Figure 5.1 : Dimension du cordon de soudure

Les mesures ont été effectuées sur des cordons de soudure obtenus dans les mêmes conditions de soudage décrites dans le chapitre.2. L'évolution du largeur des bourrelets interne et externe est différente pour les trois soudures. La position où la largeur est la plus faible se situe à l'opposé de la position où la largeur est la plus grande. La largeur des bourrelets interne est plus importante (entre les positions 3 et 6) alors que la largeur la plus faible (entre les positions 1, 2 et 7,8).

Soudure		Largeur (mm)						
N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Cordon ₁ (int)	18.83	18.44	18.65	18.30	18.05	17.62	16.95	17.37
Cordon ₁ (ext)	18.35	18.39	18.05	18.01	18.87	18.57	18.43	17.92
Cordon ₂ (int)	17.66	18.90	18.35	17.92	17.36	17.43	17.73	18.27
Cordon ₂ (ext)	17.87	18.68	19.33	18.14	18.59	18.25	17.77	19.01
Cordon ₃ (int)	18.81	18.23	17.57	16.65	18.40	18.03	18.28	18.69
Cordon ₃ (ext)	17.83	18.33	18.21	17.32	17.64	17.92	18.05	18.14
Soudure		Hauteur (mm)						
N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Cordon ₁ (int)	4.97	4.83	4.66	4.70	5.11	5.03	4.72	4.97
Cordon ₁ (ext)	4.29	4.62	4.54	4.48	4.77	4.31	4.78	4.72
Cordon ₂ (int)	4.39	4.75	4.86	4.58	4.87	4.89	4.74	4.65
Cordon ₂ (ext)	4.51	4.83	4.57	4.73	5.03	4.63	4.99	4.74
Cordon ₃ (int)	4.75	5.01	5.45	4.97	5.59	4.90	4.88	4.92
Cordon ₃ (ext)	4.27	4.67	5.08	4.22	5.34	5.15	4.85	5.10

Tableau 5.1 : Dimension des bourrelets de soudure dans la direction circonférentielle

Pour les bourrelets externes du tube, c'est le contraire puisque la largeur de la partie supérieure du tube est orientée vers le bas (positions 4 et 6) et le bourrelet interne de la partie inférieure du tube est orienté vers le haut (positions 1, 3 et 7, 8). Bien sûr, cette différence affecte la géométrie finale de la soudure, qui est résultante de toutes les positions circonférentielles et elle est la conséquence de plusieurs phénomènes conjugués (La géométrie initiale du tube due à l'extrusion, les déformations résiduelles et les conditions de soudage).

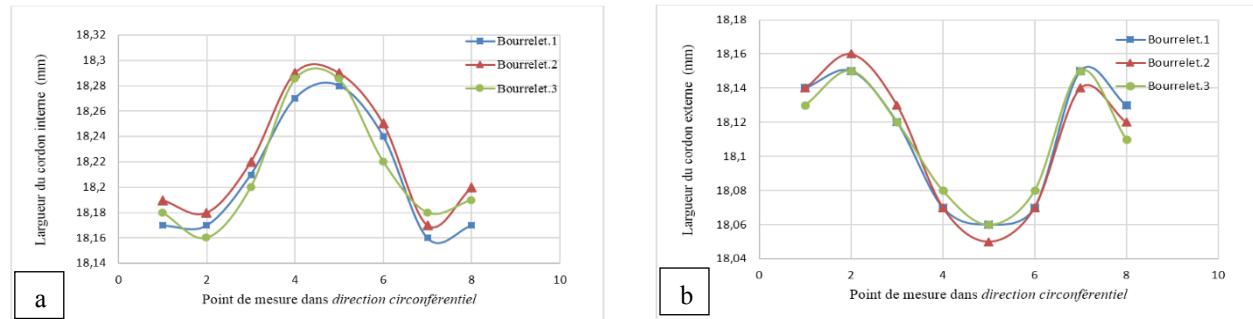


Figure 5.2 : Largeur mesurée des trois cordons de soudure (l) en fonction de la direction circonférentielle du tube. a) Bourrelets internes ; b) Bourrelets externes

Pour la hauteur des cordons de soudure qualitativement, toutes les courbes ont une allure semblable mais les épaisseurs des cordons de soudure sont différentes d'un cordon à l'autre. Une variation est constatée entre 4.39 mm à 5.02 mm dans les bourrelets interne et 4.27 à 5.08 dans les bourrelets externes (figure 5.3). La largeur et la hauteur moyenne mesurées des trois bourrelets de soudure sont respectivement $18,32 \pm 0,31$ et $4,73 \pm 0,28$ mm

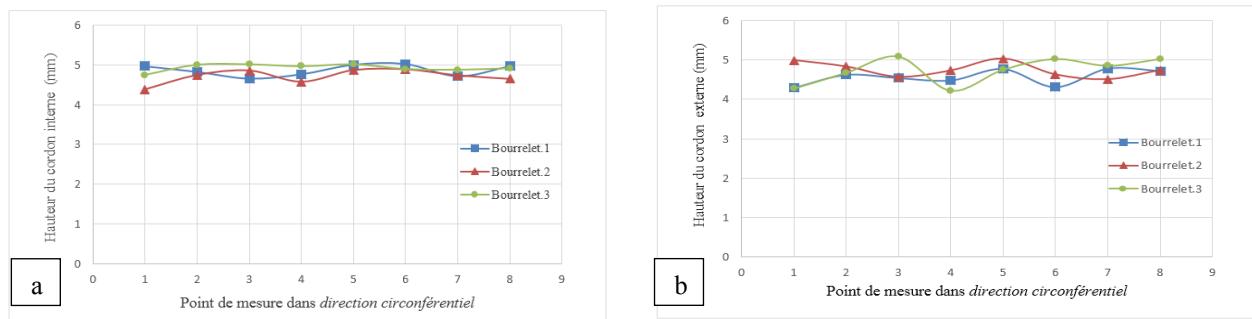


Figure 5.3 : Hauteur mesuré des trois cordons de soudure (h) en fonction de la direction circonférentielle du tube. a) Bourrelets interne ; b) Bourrelets externe

5.3 Analyse enthalpique différentielle :

La calorimétrie à balayage différentiel est utilisée de manière pratique pour étudier le comportement thermique des échantillons soudées et non soudées et quantifier l'énergie du processus de fusion sensible à la structure en déterminant : i) le taux de cristallinité et ii) la température de fusion.

Les échantillons pèsent quelque milligramme (2 - 3 mg) avec un diamètre de 5mm ont été coupées à des intervalles réguliers du matériau soudé (au centre de la soudure) et du matériau non soudé à travers les trois couches (interne, moyenne et externe). Les mesures ont été effectuées avec un appareil du type *TA Instrument Universel Analysis Q2000* avec une vitesse de chauffage de 5°C/min, selon la norme ISO 11357-1.2 [52] et refroidie à une température de 20°C à la même vitesse sous un environnement d'azote. Le protocole d'essais a été bien décrit dans le chapitre 2.

5.3.1 Température de fusion, taux de cristallinité :

5.3.1.1 Température de fusion :

La fusion des polymères a lieu sur un domaine de température plus ou moins étendu, lié à la distribution de l'épaisseur des cristaux. Dans cette étude, la température de fusion T_f est choisie au maximum du pic de fusion qui correspond à la température de fusion des cristaux d'épaisseur la plus probable. Les mesures DSC donnent également une estimation de la température de fusion à l'équilibre thermodynamique du polymère T_f^0 , en utilisant la méthode de Hoffman-Weeks [65] et l'analyse des mesures isothermiques. Dans cette approche, la température de fusion à l'équilibre est donnée par l'intersection entre la courbe linéaire de l'évolution de la température de cristallisation en fonction de la température de fusion du polymère.

5.3.1.2 Taux de cristallinité :

Le taux de cristallinité massique (X_c) d'un échantillon de polymère cristallisé est défini par le rapport de la masse des phases cristallines à la masse de l'échantillon étudié. Le taux de cristallinité X_c est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \quad (5.1)$$

ΔH_f : est l'enthalpie de fusion spécifique du polymère analysé, déterminée à partir de l'aire du pic de fusion.

ΔH_f^0 : est l'enthalpie de fusion du polymère 100% cristallin à la température d'équilibre thermodynamique, égale 293 J/g [49, 53]

La cristallinité est calculée à partir de la méthode de la surface partielle (la surface sous le pic de cristallisation à l'instant t sur la surface totale du pic). L'erreur de mesure de la cristallinité de PE est estimée à $\pm 2\%$ en poids. Les figures 5.4 et 5.5 présentent les thermogrammes de fusion des échantillons soudées et non soudées des trois couches (extérieure, moyenne et intérieure). Les températures de fusion dans le matériau non soudé de la couche interne vers l'externe sont respectivement 133.29 °C, 133.79 à 135.52°C. L'évolution est inversée dans le matériau soudé.

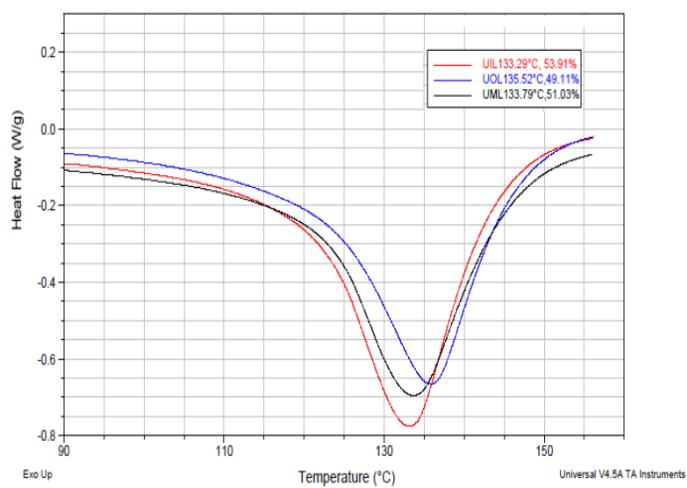


Figure 5.4 : Thermogramme de fusion des échantillons non soudées (UIL: interne , UML: moyenne et UOL: externe)

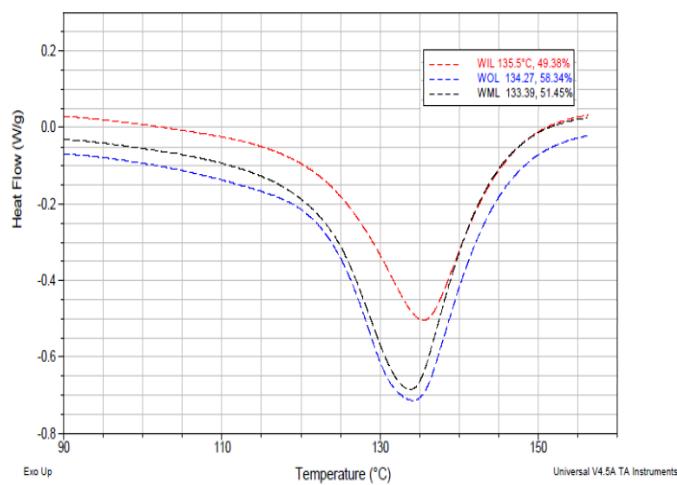


Figure 5.5: Thermo-gramme de fusion des échantillons soudées (WIL :interne, WML : moyenne et WOL : externe)

Le PE dans la région non soudée présente un point de fusion maximal de 135.52° C et une résistance thermique correspondant à une cristallinité de 49.11% en poids enregistré dans la couche externe (figure 5.4). Dans la région soudée le matériau présente un comportement de fusion similaire, que ce soit dans la couche interne, moyenne ou externe. Cependant, la température de fusion maximal a été enregistré dans la couche interne de l'ordre de 135.5 °C, l'endothermie a donné une valeur de cristallinité de 49.38% en poids.

La cristallinité calculée dans le matériau non soudé augmente de la couche externe vers la couche interne (49,11%, 51.03%, 53,91%) bien que l'allure soit inversée dans la paroi soudée elle devient plus élevée de la couche interne vers l'externe (49,38%, 51,45%, 58.34%).

Le tableaux 5.2 résume tous les résultats de cristallinité et de température de fusion obtenus à partir des thermogrammes de fusion.

Spécimens	T _f (°C)	X _c (%)
<i>Spécimens soudés</i>		
CIS	135.51	49.38
CMS	133.65	51.45
CES	134.27	58.34
<i>Spécimens non soudés</i>		
CINS	133.29	53.91
CMNS	133.79	51.03
CENS	135.52	49.11

Tableau 5.2 : Mesure de cristallinité et température de fusion dans les trois couches avec et sans joint de soudure.

Il ressort de ces résultats que la température de fusion est en fonction de la perfection des cristallites qui est évolutive de la couche interne vers la couche externe au niveau morphologique. Un écart de température de 2°C est enregistré entre la couche interne et externe dans le matériau soudé et non soudé. La couche moyenne subira la température de fusion la plus faible. Si on compare la cristallinité entre le matériau soudé et non soudé on trouve que le matériau soudé a un taux de cristallinité important puisque le chauffage du matériau en polyéthylène provoque une augmentation dans certaines propriétés mécaniques telles que la dureté et le module d'élasticité en favorisant la croissance des régions de cristallites et en augmentant la cristallinité globale de la région [48, 61 et 66].

Une comparaison de la cristallinité a été réalisée sur des tubes soudés et non soudés en utilisant la méthode de DSC et parfois la méthode de DRX. Deux types de comparaisons sont rapportés en fonction de l'emplacement de la mesure de la cristallinité. En d'autres termes, soit la cristallinité est mesurée globalement, soit en considérant des positions d'échantillonnage localisées dans la paroi suivant les trois couches : interne, moyenne et externe.

Le tableau 5.3 résume les conditions de soudage et les résultats de plusieurs études qui ont examiné l'évolution de microstructure du tube en polyéthylène [13, 15, 26-28, 48, 62]. Le matériau de la zone soudée subit de nombreuses transformations telles que la fusion, déformation, et interpénétration moléculaire, puis suivi par recristallisation, c'est-à-dire, formation d'une nouvelle structure sous l'état de contrainte imposée du processus de soudage [48]. Par conséquent, les microstructures de l'interface de soudure et ses zones affectées thermiquement établissent les propriétés mécaniques ultimes du joint [63].

Référence	Conditions	Position/ Méthode	% Cristallinité	
			Tube non soudé	Tube soudé
Dai & Peng (2017); [62]	HDPE-100, D_{ext} : 200 mm ; ep: 11.9 mm; (SDR17), T^o : 220°C et P: 0.2 MPa	XDR	66.78	69.50
Shaheer et al. (2017); [27]	HDPE-100, D_{ext} : 180 mm ; ep: 16.4 mm ; (SDR11), T^o : 230°C ; P: 0.15 MPa		63.8	67.8
Talhi et al. (2016); [13]	MDPE-80, D_{ext} : 90mm; SDR11; (ep _{min} : 8.2 mm, selon BS-ISO- 4427); Soudage à : T^o : 210°C; P: 0.15 MPa	CI	45.4	44.8
		CM	45.0	45.7
		CE	42.6	46.0
Pokharel et al. (2016); [26]	HDPE, D_{ext} : 110 mm; SDR 9; (ep _{min} : 12.3 mm, BS-ISO- 4427); T^o : 231°C; P: 0.41 MPa (Changement du temps de soudage afin de détecter le défaut du soudage à froid)		51.50	57.10
Galchun et al. (2015); [28]	Soudage des résines différentes (PE-80 et PE-100); D_{ext} : 63 mm, ep: 6 mm; T^o : 200°C and P: 0.2 MPa	DSC	PE-80 42	Mix
			PE-100 51	PE 53
		WAX	PE-80 56	Mix
			PE-100 57	PE 66
Hehn. O (2007); [15]	HDPE-100 (TU B121); D_{ext} : 160 mm; t: 14.6 mm (SDR 11); T^o : 220°C ; P: 0.18 MPa	CI	74.1	74.2
		CM	73.8	73.4
		CE	70.1	74.3
Leskovics et al. (2006); [48]	HDPE-80, Hexene-1 co-monomer, D_{ext} : 160 mm, ep: 9.8 mm; T^o : 190°C; P: 0.15 MPa	DSC	49.5	55.1
Niou et al.	HDPE-100 ; D_{ext} : 200 mm ; ep : 11.9mm (SDR=17); T^o : 220°C; P: 0.18 MPa	DRX	52	55
		CI	53.91	49.38
		CM	51.03	51.45
		CE	49.11	58.34

Tableau 5.3 : Comparaison des mesures de cristallinité pour les tubes en PE soudés par fusion b-à-b et non soudés

Pour les mesures d'échantillonnage globales, on constate que la cristallinité augmente pour le matériau soudé car les différences sont comprises entre 3 et 10%. Par conséquent, il peut être énoncé comme une règle générale :

$$\chi_{soudé} > \chi_{Non soudé} \quad (5.2)$$

Pour cette raison, il est raisonnable d'observer des propriétés mécaniques plus élevées dans les parois soudées, cela sera discuté en termes de E , σ_y , et σ_f dans l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques dans le dernier chapitre. Les résultats obtenus avec cette méthode dans les trois couches (interne, moyenne et externe) sont conformes à celles de la littérature, et il est conclu qu'il y a une évolution de cristallinité dans toute la paroi soudée (inégalité 5.3) et non soudés (inégalité 5.4) comme suit :

$$\chi_{soudé}^{interne} < \chi_{soudé}^{moy} < \chi_{soudé}^{externe} \quad (5.3)$$

$$\chi_{Non soudé}^{interne} > \chi_{Non soudé}^{moy} > \chi_{Non soudé}^{externe} \quad (5.4)$$

Ces résultats indiquent que l'effet de l'apport de chaleur et de la fusion du matériau a contribué à créer une structure plus ordonnée telle que déduite des données de cristallinité.

En effectuant l'analyse localisée proposée, il est constaté que la couche externe (CE) suit toujours la même tendance que celles des inégalités (5.3) et (5.4). En effet, la cristallinité dans notre cas est augmentée de 15% comme confirmé par d'autres études pour la couche externe (CE) [13, 48]. Pour la couche moyenne (CM), les résultats trouvés indiquent une très faible variation de la cristallinité entre les échantillons soudés et non soudés avec une différence <1%. Ceci est en accord avec les résultats d'autres études de la littérature sur la cristallinité [13, 15]. Cela pourrait avoir un rapport avec la position de cette couche qui est protégée par les deux autres couches ce qui limitera ainsi les effets des perturbations externes en termes de refroidissement indésirable du matériau ou de perte de chaleur par convection naturelle. Bien que l'interface soit faite de matériau fondu des deux extrémités du tube, les enchevêtrements de chaîne et le refroidissement sont obtenus dans des conditions similaires à l'extrusion, et la structure finale serait donc à un niveau similaire de cristallinité [13, 15].

Enfin, les mesures de cristallinité pour la couche interne (IL) sont en faveur des tubes soudés par rapport aux tubes non soudés ; cependant, certaines études n'ont pas trouvé de variations significatives, et elles restent généralement inférieures à 1% [15]. Cette conclusion peut être étendue même au soudage de tubes de résines différentes (HDPE-100 et HDPE-80) où il a été constaté que la cristallinité est améliorée jusqu'à 20% pour les joints soudés comme indiqué dans le tableau 5.3 [28]. Globalement, les résultats de cristallinité montrent des variations de l'ordre de 3 à 20%, alors que pour les mesures localisées, les pourcentages de changements sont plus faibles notamment pour les couches internes (1 à 7%). Pour la couche intermédiaire où la qualité de la soudure est la plus élevée, aucune rupture n'ayant été observée pour ce lot, les mesures de cristallinité sont moins dispersées et le pourcentage de changement est resté inférieur à 1%. D'autre part, pour les couches externes, les différences vont de 5 à 15%.

La figure 5.6 illustre l'évolution de cristallinité pour les tubes soudés et non soudé en fonction de la position de la paroi. Une augmentation de la cristallinité est observée pour les tubes soudés de l'intérieur vers les couches extérieur, tandis que pour les tubes non soudés, l'évolution est dans la direction opposée. Cette situation est confirmée par les données de la littérature, tel que discuté précédemment dans le tableau 5.3. En outre, pour le matériau de base

(non soudé), l'évolution est également confirmée par d'autres études pour deux différents tubes de résines (HDPE-80 et HDPE-100) [32, 33].

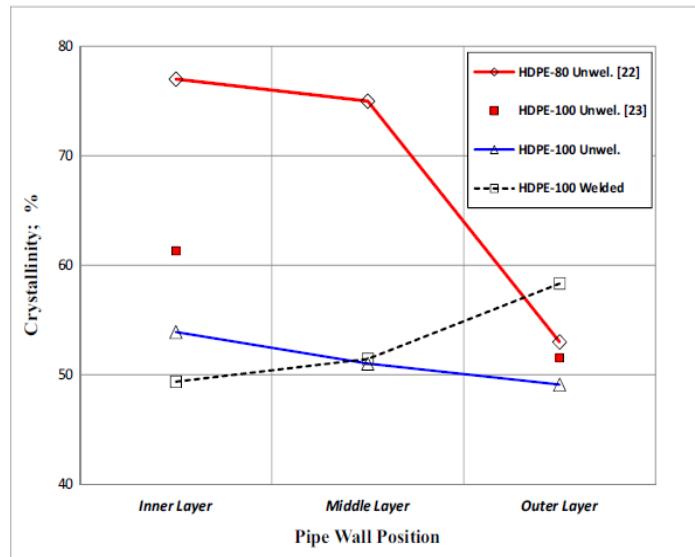


Figure 5.6: Evolution de la cristallinité pour les tubes soudés et non soudés en fonction de la position de la paroi

5.4 Mesure de Micro-dureté :

Les études des propriétés micromécanique à travers les soudures bout à bout par micro-indentation (MI), ont révélé que la zone de fusion (MZ) est entourée d'une zone affectée thermiquement (HAZ) caractérisée par une augmentation continue des propriétés du matériau par rapport au matériau de base [27]. Les techniques de micro-indentation ont montré que les polymères amorphes ont un minimum de dureté et de module d'indentation dans le joint de soudure dont aucune modification dans ces propriétés, alors que pour les polymères semi-cristallins, la dureté et le module d'indentation passent généralement par un maximum dans la ligne de soudure, le joint soudé ou la zones affectée thermiquement [27, 54]. Ce paragraphe résume nos investigations menées avec la technique de micro-indentation concernant le comportement mécanique local des joint de soudure à travers la paroi dans les trois couches interne, moyenne et externe.

Les mesures de micro-dureté Vickers ont été effectuées avec l'appareil INOVATEST NEXUS 4500. Le protocole d'essais a été bien détaillé dans le chapitre 2. Les mesures ont été effectuées à travers la paroi dans les trois couches (interne, moyenne et externe) et sur différents endroits situés dans : i) Le matériau de base, ii) la zone de fusion (ZF) et iii) la zone affectée thermiquement (ZAT). Les résultats des mesures sont présentés dans le tableau 5.4.

Micro-Hardness (Kg.mm ⁻²)			
<i>Position</i>	<i>Inner</i>	<i>Middle</i>	<i>Outer</i>
<i>Matériau de base</i>	5.98	5.42	5.11
	5.77	5.37	5.23
	5.92	5.56	5.16
Moy	5.89	5.45	5.16
S.DEV	0,10	0,09	0,06
<i>ZF</i>	6.10	6.43	6.77
	6.23	6.52	6.71
	6.31	6.49	6.64
Moy	6.21	6.48	6.7
S.DEV	0,1	0,045	0,09
<i>ZAT</i>	5.02	5.53	5.64
	5.11	5.42	5.59
	5.19	5.57	5.71
Moy	5.1	5.5	5.64
S.DEV	0,08	0,07	0,06

Tableau 5.4 : Mesure de la micro-dureté à travers la paroi du tube

Les résultats de l'évolution de micro-dureté Vickers pour différentes positions à travers la paroi (CI, CM, CE) sont présentés dans l'histogramme de la figure 5.7. Chaque résultat provenant de la valeur moyenne du minimum de trois mesures effectuées sur le matériau de base et le matériau soudé.

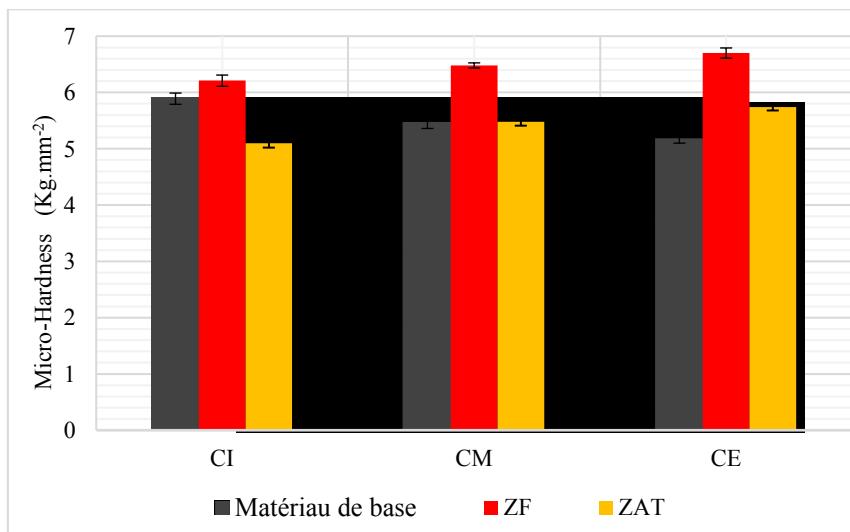


Figure 5.7 : Evolution de Micro-dureté pour différentes positions à travers la paroi du tube soudé et non soudé

Le matériau de base en PE100 est caractérisé par la plus faible dureté par rapport au matériau soudé dont :

$$MHv_{soudé} > MHv_{Non soudé} \quad (5.6)$$

L'évolution à travers la paroi non soudée est de l'ordre suivant :

$$MHv_{non soudé}^{externe} < MHv_{non soudé}^{moy} < MHv_{non soudé}^{interne} \quad (5.7)$$

On constate que l'ordre est totalement inversé dans le matériau soudé dont la dureté est augmentée de la couche interne vers la couche externe quel que soit dans la zone de fusion ou la zone affectée thermiquement et le maximum de dureté (MHv) est associé à la couche externe (inégalité 5.8) :

$$MHv_{soudé}^{interne} < MHv_{soudé}^{moy} < MHv_{soudé}^{externe} \quad (5.8)$$

La zone de fusion (ZF) a enregistrée la plus grande micro-dureté dans les trois couches par rapport au zone affectée thermiquement :

$$MHv_{soudé}^{ZAT} < MHv_{soudé}^{ZF} \quad (5.9)$$

Le fait que la micro-dureté est augmenté de 17% dans le matériau soudé - zone de fusion (ZF) par rapport à celle du matériau de base (MB) est peut-être expliqué par le cycle thermique qu'a subi la zone de fusion (ZF) durant les quatre phases de l'opération de soudage. Les effets thermiques générés par le soudage semblent donner un maximum de dureté. Les résultats de micro-dureté sont en bon accord avec les résultats de cristallinité dont on a constaté la même tendance à travers les trois couches (croissante dans le matériau soudé et décroissante dans le matériau de base) de la couche interne vers la couche externe.

5.5 Analyse microscopique des surfaces de rupture :

L'étude microscopique des soudures a confirmé la présence d'une zone de fusion uniforme sans défauts et une fusion complète à l'interface qui empêchait la réduction des performances mécaniques [69]. Ces exemples soulignent les difficultés techniques croissantes dans l'étude de la zone de soudure. Les méthodes de caractérisation existantes sont adaptées et améliorées dans la mesure est possible, mais les objectifs restent généralement inchangés en termes de meilleures propriétés mécaniques, de microstructure homogène et de techniques de soudage fiables. Alternativement, il est établi que les changements microstructuraux dans la zone affecté thermiquement (HAZ) commencent avec une zone sphérolitique très mince suivi d'une zone colonnaire (ou structure lamellaire) et finalement la zone déformée (souvent appelée zone de cisaillement) ayant des sphérolites relativement grossières. Le comportement du matériau soudé à la résistance a été mise en évidence à travers une investigation par observation microscopique des surfaces de rupture après essais de traction, dont on a examiné deux types de rupture : i) rupture sur joint de soudure (RS), ii) rupture hors joint de soudure (RHS) au

moyen d'un microscope à balayage électronique, qui permet une observation au relief des surfaces rompue dont les deux éprouvettes sont extraites de la même soudure.

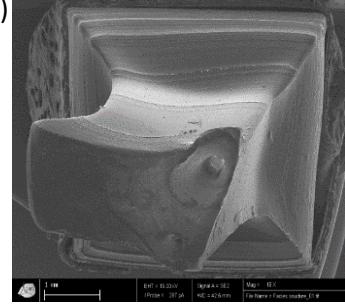
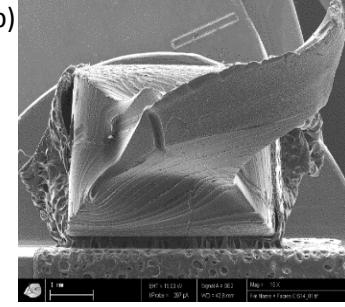
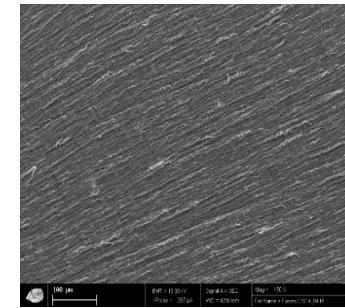
<i>Type de rupture</i>	<i>Rupture sur joint de soudure (RS)</i>	<i>Rupture hors joint de soudure (RHS)</i>
Eprouvette après essais de traction		
Image MEB: a) Bar = 1 um b) Bar = 100um	a)  b) 	b)  

Tableau 5.5 : Vue de fractographie MEB au centre des spécimens soudés après essais de traction

Les observations micrographiques des surfaces de rupture à la température ambiante sont illustrées dans le tableau 5.5. La figure a : montre la surface de rupture d'une soudure de mauvaise qualité, on constate la présence des micro-vides ou microfissures dans la fractographie qui peuvent être considérées comme des preuves de la propagation de fissure enfin une rupture fragile s'est alors produite. L'éprouvette qui a subi une rupture hors joint de soudure (figure b) montre quelque fibrillation dans les surfaces de rupture après essais de traction. Lorsque la quantité de fibrillation augmente, la soudure est considérée comme une soudure médiocre et ce peut être la cause d'une opération de soudage incomplète ou des mauvaises conditions de soudage [25-41]. Pour avoir plus de détail sur le comportement mécanique de la soudure consulté le **chapitre.6**.

Chapitre.6

ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PROPRIETES MECANIQUES

6.1 Introduction :

La question de la distribution des propriétés mécaniques à travers la paroi des tubes extrudés dans des conditions spécifiques a été expliquée en termes de variation de la structure (morphologie) et des contraintes résiduelles (internes) [67, 68, 69]. Dans le cas des tubes extrudés fabriqués à partir des résines de polyéthylène de haute densité, le problème a été abordé expérimentalement en deux phases nécessaires à résoudre les difficultés liées à la nature de la méthode adoptée à extraire les propriétés recherchées (Méthode destructives ou non destructives). Dans la littérature, les méthodes non destructives sont utilisées pour caractériser seulement les couches minces hors de la paroi du tube. Cependant, pour réaliser toutes ces idées sur la distribution de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques dans des tubes ayant (un épaisseur $\geq 10\text{mm}$), nous devons utiliser des techniques d'usinage dans des conditions de fonctionnement adéquates, ce qui devrait minimiser les déformations du matériau et la génération de la chaleur par friction afin d'éviter des changements [10,11, 49]. Dans une phase primaire, des longs filaments en HDPE étaient orthogonalement usinés dans des conditions spécifiques afin de conserver l'histoire thermique et structurelle enracinée dans la paroi du tube en raison du procédé de fabrication (c'est-à-dire qu'un filament s'étend de la surface extérieure du tube à l'intérieur). Cela a été montré qu'une distribution des propriétés mécaniques existe et était corrélé avec la morphologie de la paroi du tube en utilisant la cristallinité [34]. Dans une deuxième phase sur les éprouvettes normalisées selon la norme ASTM, Il a été observé que les propriétés mécaniques liées au contrainte ont augmenté de l'extérieures vers les couches intérieures impliquant un effet important de la morphologie en particulier la cristallinité et les liquides absorbés [32, 35].

6.2 Etude du comportement mécanique du matériau de base en HDPE :

La figure 6.1 montre le comportement contrainte-déformation des éprouvettes usinées à partir du matériau de base (PE100). Généralement, pour les trois couches du tube non soudé (intérieur : CINS, milieu : CMNS, et extérieur : CENS), le comportement mécanique est très similaire, où il est montré les trois zones typiques des résines de polyéthylène semi-cristallin sous traction uni-axiale :

La première (I) est une zone élastique linéaire qui montre une déformation élastique initialement isotrope avant le crochet de contrainte associée au seuil d'écoulement, elle est limitée de ($\epsilon \sim 20\%$) et σ_y (ou $\sigma_{\text{max-élastique}}$).

La seconde (II) est une zone de déformation plastique caractérisée par un plateau d'écoulement horizontal, la striction se propage le long de l'éprouvette en transportant une déformation jusqu'à ($\epsilon \sim 300\%$) avec des strictions multiples.

Enfin la troisième zone (III) est le phénomène de durcissement plastique habituellement associé à une progression du phénomène d'orientation des chaînes macromoléculaire jusqu'à la rupture ductile qui se produit au-delà de ($\epsilon \sim 450\%$) [35, 42, 48, 63, 64]. Cependant, une telle dispersion à cette position est moins prononcée pour les cas des couches internes et moyennes (CI et CM) (Figure 6.1a, b) cela est dû à la cristallinité qui augmente habituellement en se déplaçant vers la couche interne du tube. Au début de l'étape de durcissement plastique ($\epsilon \geq 325\%$), un plateau d'étrirement plastique se forme dans les trois couches (CINS, CMNS, CENS) à une moyenne de 15MPa de contrainte (palier de contrainte) dans un intervalle de 350 jusqu'à

400% de déformation. Ce qui est probablement dû à la dégradation des chaînes suite à l'étiement élevé. Pour le niveau de contrainte moyen de la zone de durcissement plastique, on observe qu'il décroît de la couche interne vers l'extérieur. Les intervalles limites supérieurs et inférieurs approximatifs pour CINS, CMNS et CENS sont respectivement [16-18MPa], [14-17,5MPa], et [13-16MPa], (figure 6.1).

Enfin, il devrait être noté que la procédure de test développée permet d'illustrer une représentation synchronisée en 2D de chaque courbe contrainte-déformation possible pour les cas non soudés (c'est-à-dire un total de 13 spécimens par couche) tout le long de la direction circonférentielle du tube et à différentes positions dans la direction radiale (c-à-d total de 3 couches).

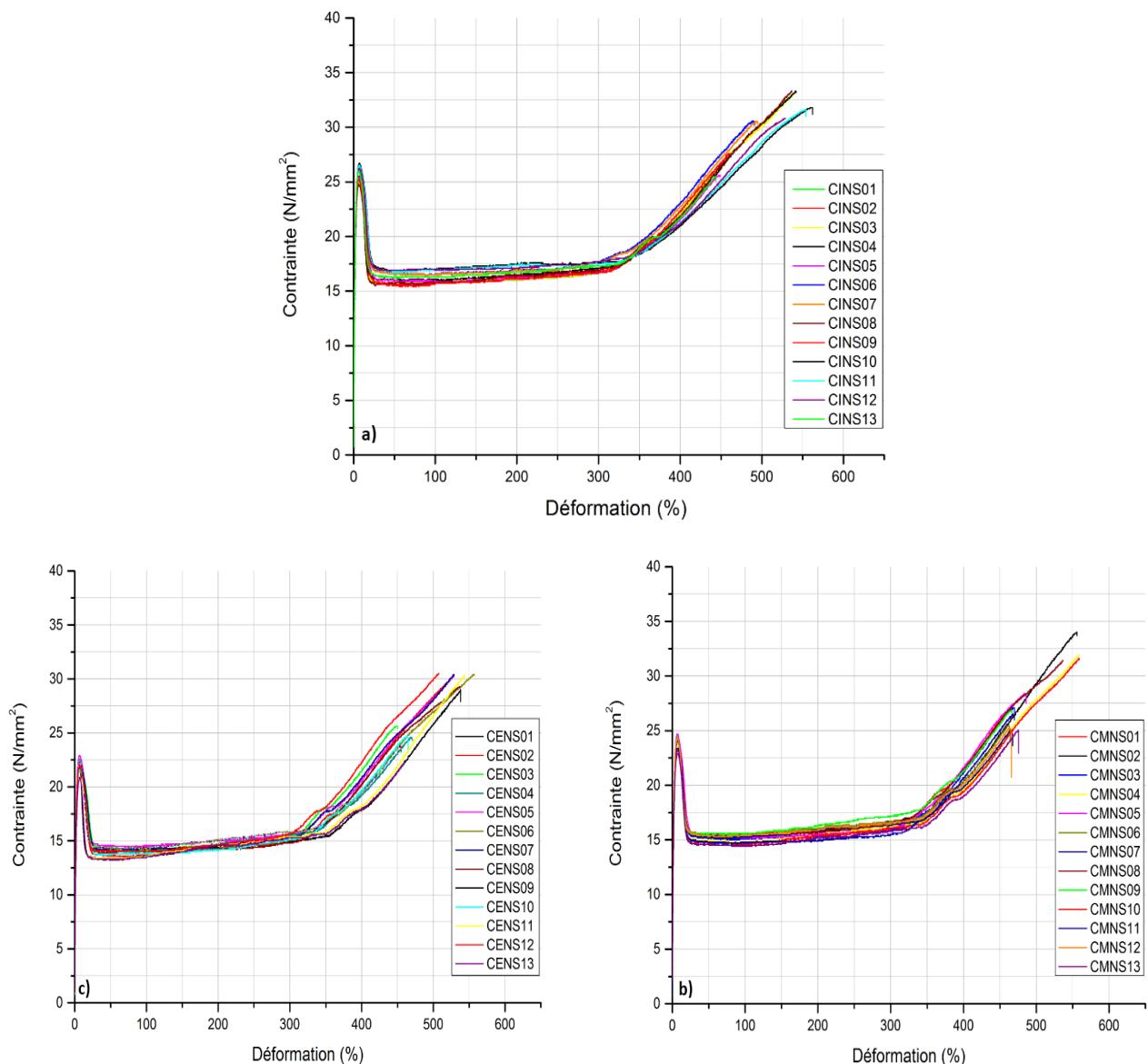


Figure 6.1 : Courbes σ - ϵ des tubes non soudés :
 a) Couche interne (CINS), b) moyenne (CMNS) et c) Externes (CENS)

6.3 Etude du comportement mécanique du joint soudé en HDPE :

La Figure 6.2 montre une vue de dessus localisant les 39 éprouvettes ayant dégagées le long de la circonférence de la soudure et à travers la paroi des couches (interne, moyenne et externe), le cercle jaune localise les spécimens déchirés au joint de soudure (RS), Les essais de traction des éprouvettes soudés des couches interne, moyenne et externe ayant permis de dégager deux catégories de résultats bien illustré dans la courbe contrainte-déformation (figure 6.3).

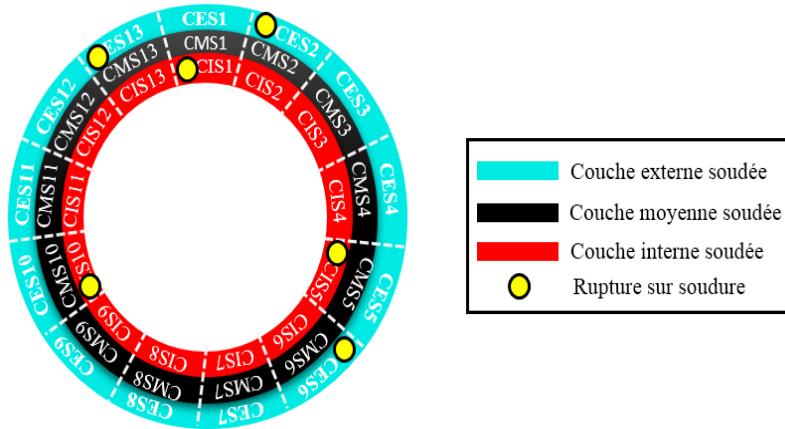


Figure 6.2: Disposition des éprouvettes le long de la circonférence du tube et à travers la paroi.

Le 1er type est une rupture hautement ductile à l'extérieur du joint de soudure désigné par (RHS) et le 2^{ème} est une rupture à la soudure remarquée par une diminution de ductilité désignée par (RS), la couche moyenne n'a subi aucune rupture à la soudure.

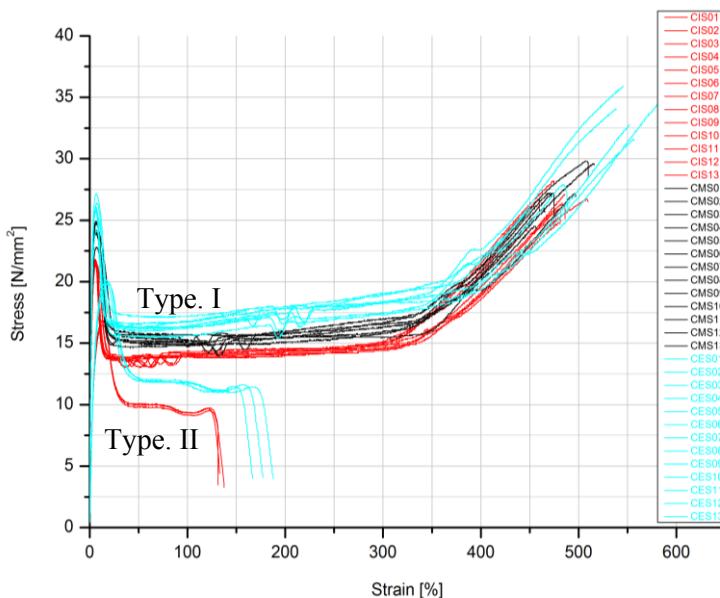


Figure 6.3 : Résultats de comportement contrainte-déformation des 39 éprouvettes soudés
(Type. I : Rupture hors soudure ; Type. II : Rupture sur joint de soudure)

Les figures 6.3 et 6.4 illustrent le comportement contrainte-déformation des éprouvettes soudés extraits longitudinalement dans les trois couches (CIS : couche interne soudée, CMS : couche moyenne soudée et CES : couche externe soudée). De même, les trois zones observées sur (la figure 6.1) sont maintenues, mais les valeurs limites sont très différentes en raison des incidences de soudage et les effets résultants générés par des changements thermomécaniques dans la structure [15, 26, 28, 48, 66]. Par conséquent, on peut argumenter qu'une soudure correctement faite ne devrait pas modifier le comportement mécanique global du matériau. De plus, les normes de fabrication et d'assemblage des tubes imposent que chaque fois que les paramètres externes sont modifiés, l'altération de la microstructure initiale soit épargnée si elle n'est pas améliorée pour une meilleure résistance et des opérations beaucoup plus sûres [48].

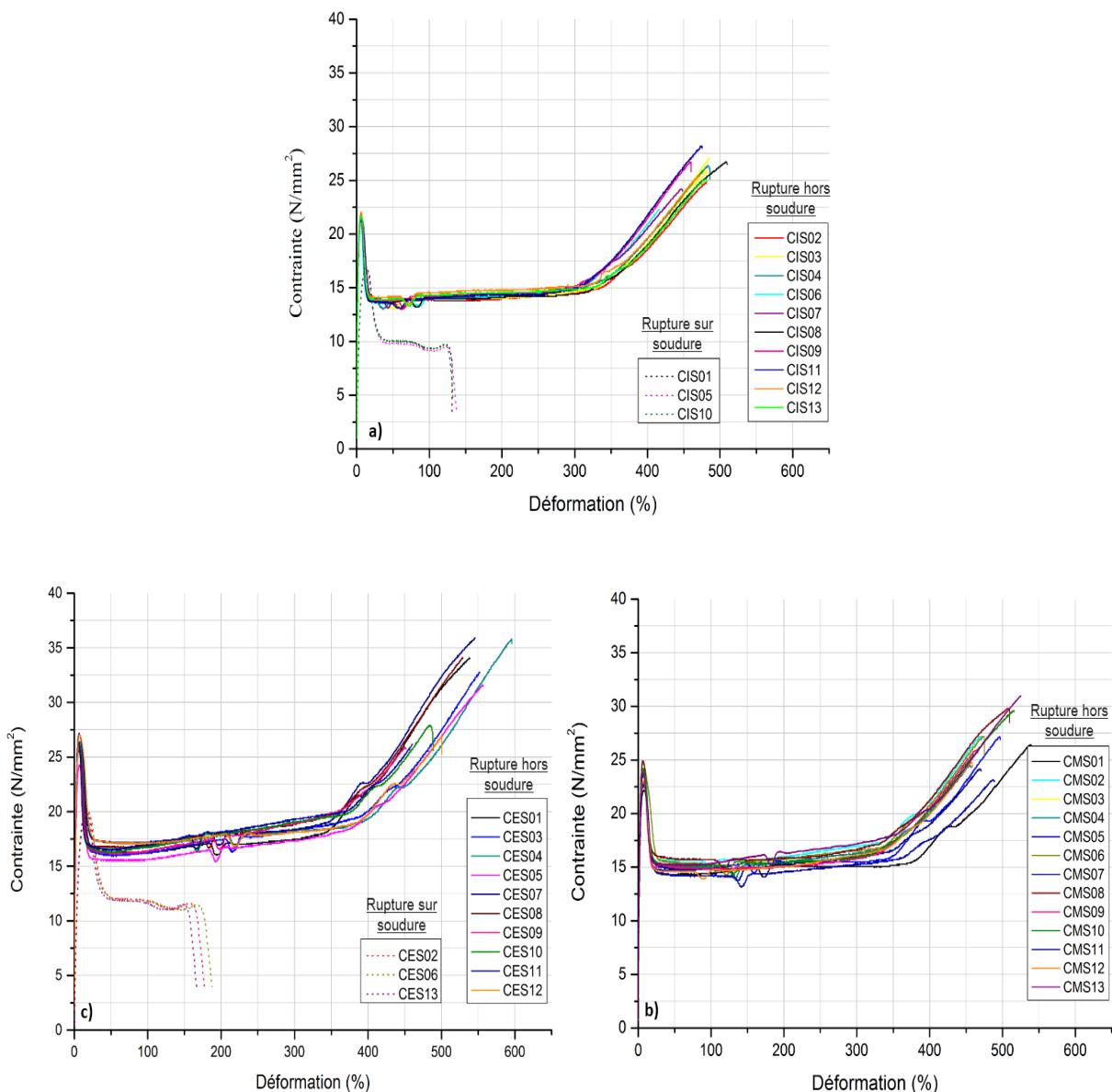


Figure 6.4 : Courbes σ - ϵ des tubes soudés :
a) Couche interne (CI), b) moyenne (CM) et c) Externes (CE)

En premier lieu, la reproductibilité observée des courbes contrainte-déformation des couches internes est importante pour les éprouvettes déchirées au niveau du joint de soudure (figure 6.4a) ; cependant, la dispersion augmente et devient visible dans la zone III lors du déplacement dans la direction radiale du tube, c-à-d de la couche intérieure soudée vers la couche extérieure soudée. En effet, (la figure 6.4a-c) indique que la dispersion est initiée à différents niveaux de déformations (300, 250 et 25%, respectivement, pour CIS, CMS et CES). De plus, les propriétés mécaniques représentées par σ_y , σ_f et ϵ_f ont augmenté, ce qui indique que la résistance est plus élevée et que la ductilité de la couche externe soudée est meilleur par rapport au couche moyenne et interne malgré les différences enregistrées. Lorsqu'on considère les couches interne et externe soudées, σ_y et σ_f augmentent respectivement de 19 et 22%, alors que l'augmentation des mêmes propriétés entre la couche interne et la couche moyenne reste beaucoup plus faible, à savoir respectivement 12 et 6%. Les déformations à la rupture (ϵ_f) ont montré peu de variation dans les trois cas, et elles sont réparties approximativement entre 425 et 600% avec une légère importance pour les couches extérieures soudées.

Dans la zone II, une faible chute de la contrainte d'étirage à froid est observée pour chaque courbe (contrainte-déformation) des éprouvettes soudées, comme le confirme la littérature [66]. Cette instabilité intrinsèque correspond au moment où la striction traverse la soudure provoquant une chute de contrainte. La taille et la forme sont maintenues plus ou moins invariantes pour toutes les courbes des couches analysées (CIS, CMS et CES). Ces événements ont eu lieu dans la zone d'étirage à froid à des intervalles relativement spécifiés de contraintes relativement constantes (σ_{cd}). Il convient de noter que les intervalles d'occurrence sont en fonction de la position à travers la paroi du tube. En termes de pourcentage de déformations, ces plages sont [28-95%], [105-160%] et [160-230%], respectivement, pour CIS, CMS et CES.

Caractéristiques	Symbol / Unité	CIS	CMS	CES
Intervalle d'allongement d'étirage plastique, Zone II Figure. 6.4 (Rupture hors soudure)	$\langle \Delta_{ecd} \rangle$ % Déformation	17 – 310	25 – 330	20 – 350
Intervalle d'allongement correspondant pour l'instabilité de contrainte due à l'éirement de la soudure, Zone II, Figure. 6.4 (RHS)	$\langle \Delta_{\epsilon} \text{ (éirement à la soudure)} \rangle$ % Déformation	28 – 95	105 – 160	160 – 230
% Rupture sur soudure (RS)	%	23.07	0	23.07
Diminution relative de σ_{cd} (RHS vs RS)	%	29.80	–	31.30
Diminution relative de σ_y (RHS vs RS)	%	22.83	–	25.92
Diminution relative de ϵ_f (RHS vs RS)	%	24.51	–	31.56

Tableau 6.1: Comparaison entre $\langle \Delta_{ecd} \rangle$, $\langle \Delta_{\epsilon} \text{ fluctuation de soudure} \rangle$, % de rupture et les diminutions relatives de σ_y , ϵ_f , et σ_{cd} pour les couches soudés (CIS, CMS and CES)

Lorsqu'on superpose les trois résultats, il devient évident que ces intervalles englobent une partie continue de la zone d'étrage à froid équivalant à plus de la moitié ($> 50\%$) de la zone II (tableau 6.1). Le niveau de contrainte moyen (σ_{cd}) augmente en fonction de la position en allant de la couche interne vers la couche externe (CIS ~ 14 MPa, CMS $\sim 15,5$ MPa et CES ~ 17 MPa).

6.4 Comparaison des comportements du matériau soudés et non soudés :

La figure 6.5 compare chaque courbe de contrainte-déformation en couple (soudé et non soudé) avec σ_y le plus élevé parmi les six cas considérés dans cette étude lorsque la rupture finale a eu lieu à l'extérieur de la soudure. Pour les ensembles soudés et non soudés, les tests identifiés respectivement sont (CIS08, CMS08, CES07) et (CI06, CM06, CE01). Les ordres observés en fonction de σ_y sont les suivants :

$$\sigma_y|_{CI} > \sigma_y|_{CM} > \sigma_y|_{CE} \quad (6.1)$$

$$\sigma_y|_{CES} > \sigma_y|_{CMS} > \sigma_y|_{CIS} \quad (6.2)$$

On remarque que les ordres sont inversés car le cas du matériau non soudé indique que la couche interne est la plus forte ; la cristallinité plus élevée à la surface interne du tube améliore généralement cette résistance [35,50]. Pour les éprouvettes soudés, l'opération de fusion, de mélange et de refroidissement offre un nouveau comportement mécanique au matériau soudé en plus la présence des zones affectées thermiquement autour de la soudure. Les indications (a), (b) et (c) dans la figure 6.5 montrent des piques de contrainte dans la zone d'étrage plastique [26, 27, 48].

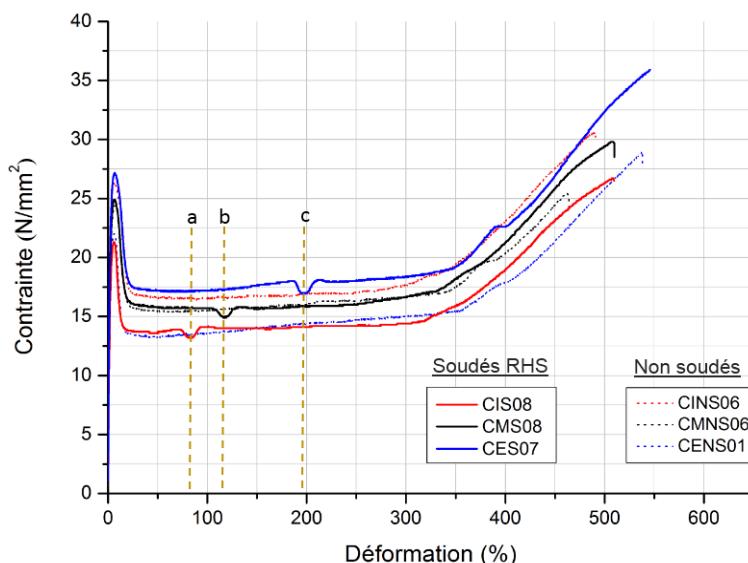


Figure 6.5 : Comparaison entre les courbes σ - ϵ représentatives pour les spécimens non soudés (CINS, CMNS et CENS) et spécimens soudés (CIS, CMS et CES). Les pointillés "a", "b" et "c" montrent l'apparition d'étrage de la soudure

De la même manière, la figure 6.6 compare le comportement contrainte-déformation en fonction de σ_y max, pour le cas où la rupture s'est produite au hors de la soudure (CIS08, CMS08, CES07) et à la soudure (CIS10 et CES02). Par exemple, lorsque la rupture a eu lieu à la soudure, σ_y pour CES02 a chuté de 27% (référence CES07) et ϵ_f pour CIS10 a augmenté de plus de 74% (référence CIS08). Comparé aux courbes normales correspondantes, une rupture de type fragile à la soudure montre des résultats inacceptables.

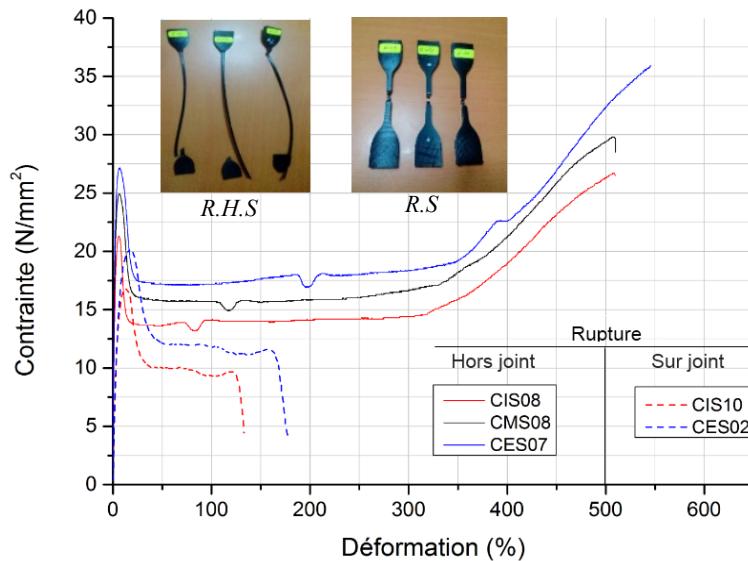


Figure 6.6 : Comparaison entre les courbes σ - ϵ des échantillons soudés avec une rupture hors de la soudure « RHS » et rupture à la soudure « RS »
Aucune rupture sur soudure observée pour la couche moyenne (CMS)

Encore une fois, l'ordre est respecté pour le cas soudé à travers la couche intermédiaire et qu'il n'est pas provoqué de défaillance à la soudure (Inégalité 6.3) :

$$\sigma_y^{RS}_{|CES} > \sigma_y^{RS}_{|CIS} \quad (6.3)$$

L'approche des propriétés mécaniques dans les directions radiales et circonférentielles a permis de détecter la plus faible partie de la soudure en réduisant la section transversale pour la caractérisation mécanique (c'est-à-dire, au lieu d'un seul échantillon d'essai, cette méthode a permis de confectionner trois lots d'échantillons comme indiqué sur la figure 4.1, Chapitre.4). Par conséquent, une soudure sur terrain qui peut être acceptée après une inspection visuelle peut révéler une partie locale inférieure aux normes du joint complet. Dans cette étude, il s'est avéré que six éprouvettes appartenant aux couches interne et externe (trois dans chaque couche) ont échoué aux interfaces de la soudure et montrent un faible allongement à la rupture (figure 6.6). Comme attendu, les caractéristiques mécaniques sont significativement réduites de près d'un quart pour σ_y et d'un tiers pour ϵ_f .

La zone d'étrage à froid est également largement affectée par la rupture à la soudure ; la valeur moyenne de σ_{cd} a chuté de $\sim 30\%$ et a évolué sans durcissement plastique ultime. Enfin, les couches moyennes (CMS) sont restées solides et fiables car elles n'ont pas montré de

rupture aux joints de soudure, probablement parce que les bords de la couche moyenne n'ont pas été affectés par la formation des cordons de soudure et que la fusion des matériaux s'est bien déroulée dans zone de fusion (figure 6.6). D'un autre côté, des ruptures fragiles causées par une fusion incomplète, un environnement poussiéreux et un défaut de surface, pour les cas des couches interne et externe soudés (CIS et CES) sont possibles à la fois dans les surfaces externes et internes du tube.

6.5 Évolution des propriétés mécaniques :

(Les figures 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 et 6.12) illustrent certaines propriétés mécaniques du polyéthylène pour les trois cas : (i) tube non soudé, (ii) tube soudé avec une rupture à la soudure, et (iii) tube soudé avec une rupture hors soudure pour les trois couches. L'analyse est faite sur la base d'une comparaison entre les résultats aux trois positions (intérieure, moyenne et extérieure)

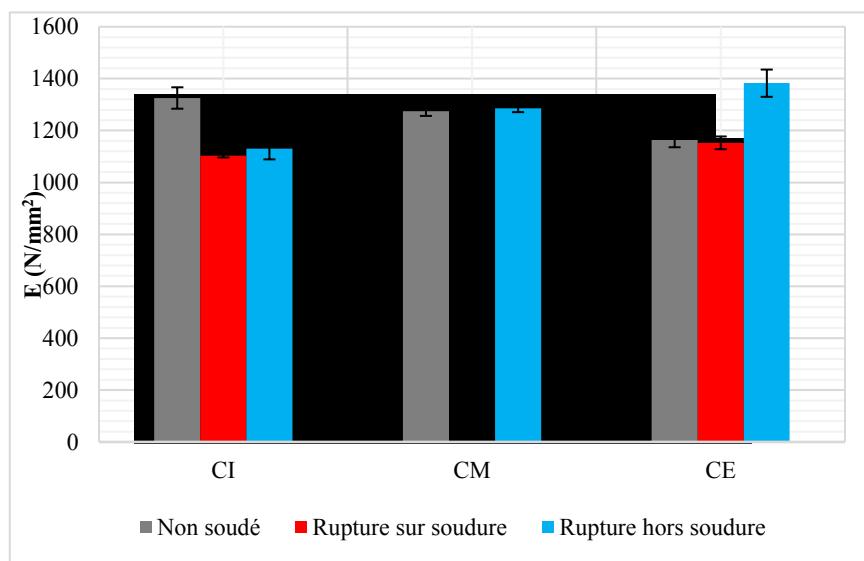


Figure. 6.7 : Variation du Module de Young pour différentes positions à travers la paroi du tube

Le module d'élasticité du matériau obtenu est selon l'ordre suivant (figure 6.7) :

$$E_{\text{non-soudé}}^{\text{intérieur}} > E_{\text{non-soudé}}^{\text{moyenne}} > E_{\text{non-soudé}}^{\text{extérieur}} \quad (6.4)$$

En considérant le cas des tubes soudés, l'ordre observé est inversé ; c'est-à-dire que le maximum du module E est associé à CES. Ce dernier résultat est valable pour la limite d'élasticité (figure 6.8) et la contrainte nominale à la rupture (Figure.6.9). Il devrait être mentionné que les propriétés résultant de la rupture d'une soudure sont généralement beaucoup plus basses (figures 6.7, 6.8 et 6.9). En termes de déformation à la rupture, les trois positions ont fourni pratiquement les mêmes valeurs pour le cas non soudé ; cependant, l'introduction de la soudure a perturbé une telle stabilité, car elle diminuait entre 14 et 18% pour les couches internes et moyenne.

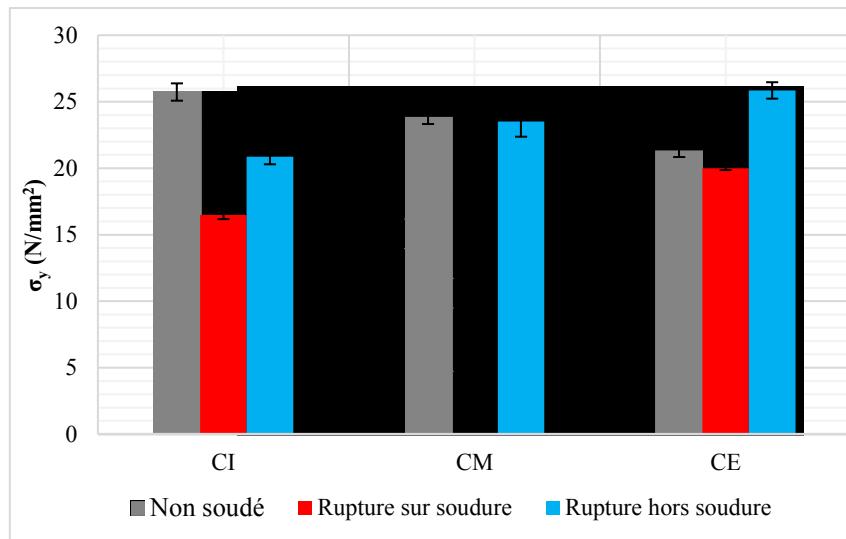


Figure. 6.8 : Variation de contrainte au seuil d'écoulement pour différentes positions à travers la paroi du tube

Sur la couche externe, la déformation à la rupture du joint soudé est restée comparable à celui du non soudé alors qu'elle a diminué de 78% dans le cas d'une rupture sur joint de soudure (Figure 6.10). Dans cette étude, une telle condition est validée en particulier pour la couche externe soudé car la variation de $\varepsilon_{f\text{-moyen}}$ entre les échantillons non soudés et soudés est proche de zéro et ne dépasse pas les 20% pour CIS et CMS.

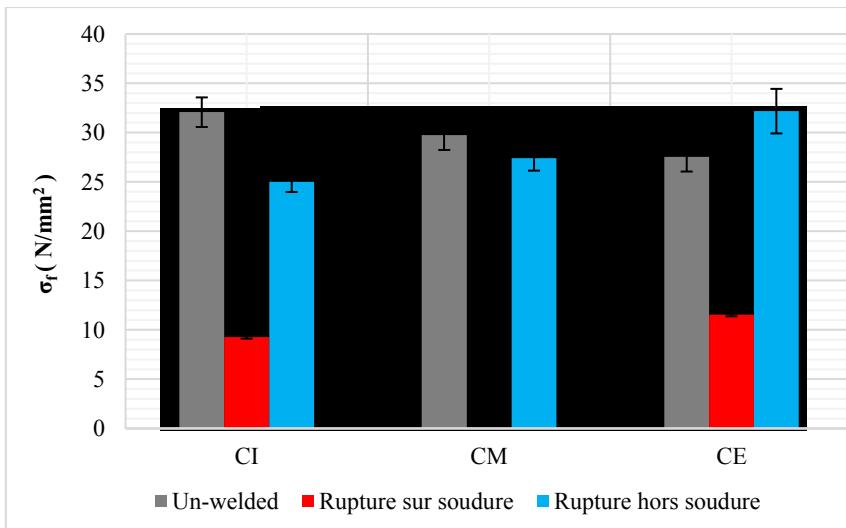


Figure. 6.9 : Variation de la contrainte nominale à la rupture pour différentes positions à travers la paroi

Les deux autres propriétés importantes du polyéthylène semi-cristallin qui ont été analysés sont : la contrainte d'étrage à froid (σ_{cd}) et l'étendue de la zone de déformation plastique ($\Delta\varepsilon_{cd}$) [34, 50]. On observe que la tendance dans la contrainte d'étrage plastique σ_{cd} , va de la couche interne vers l'externe, et qu'elle est la même que E , σ_y et σ_f : (i) décroissant pour les cas du matériau non soudés et (ii) croissant pour le cas du matériau soudé, quel que

soit l'endroit de la rupture (Figure 6.11). Pour $\Delta\varepsilon_{cd}$, les résultats globaux montrent les mêmes niveaux avec moins de 9% de différence pour les éprouvettes non soudées et les ruptures en dehors de la zone de soudure.

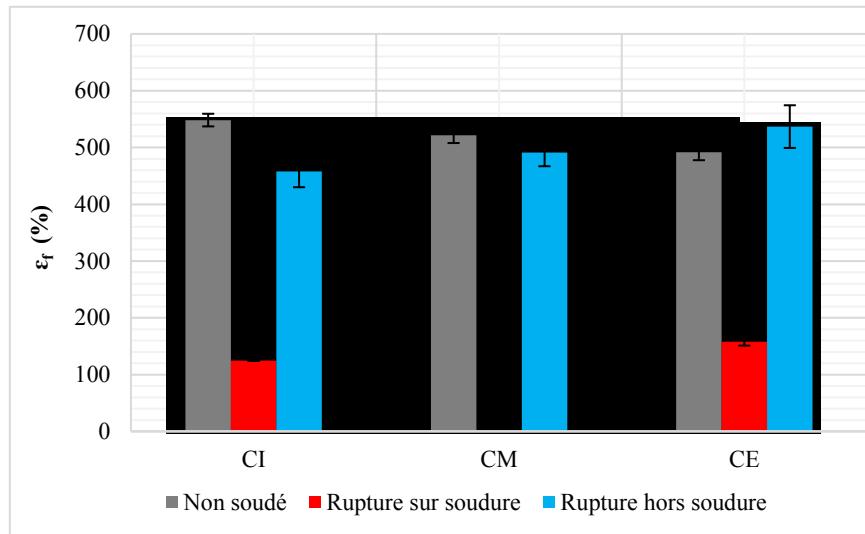


Figure. 6.10 : Variation de la déformation à la rupture pour différentes positions à travers la paroi du tube

On conclut que cette propriété n'est pas affectée par la présence de la soudure ; en d'autres termes, le plateau d'étrage plastique du matériau dépend principalement de la quantité de matériau à déformer (figure 6.12). Dans les (Figures. 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 et 6.12) la rupture à la soudure a donné les propriétés les plus faibles en termes de contraintes et de déformations dans toutes les couches.

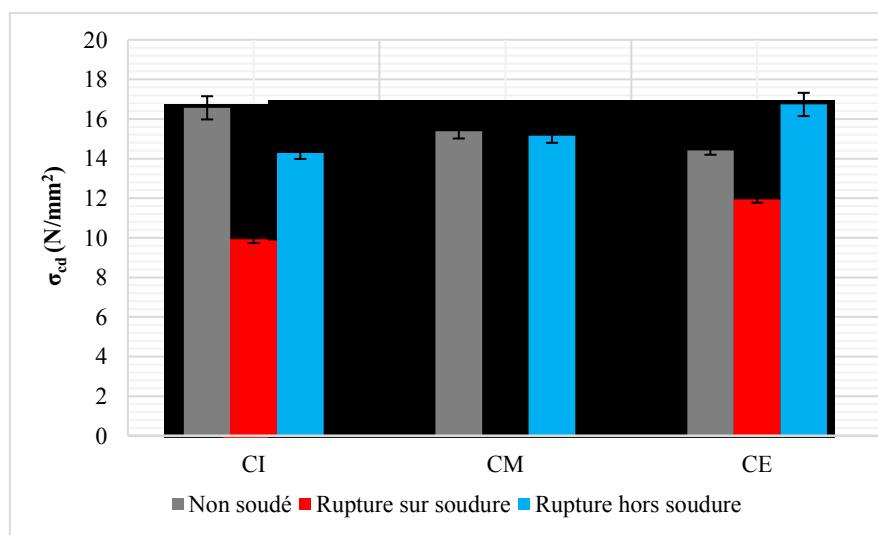


Figure 6.11 : variation du contrainte d'étrage à froid pour différentes positions à travers la paroi du tube

Dans cette étude, il a été observé que les couches moyennes (CMNS et CMS) ont des propriétés mécaniques très proches des contraintes (σ_y , σ_f et σ_{cd}). Des valeurs de ϵ_f similaires ont été observées en particulier pour les couches externes (CENS et CES), tandis que celles concernant les couches moyennes (CMS et CMNS) sont un peu plus faibles, mais comme elles sont toutes $> 400\%$, ceci est une bonne indication qu'elles ont été réalisées dans des conditions optimales (figure 6.10). Habituellement, lorsque la soudure est effectuée correctement, la rupture se produit par fibrillation (fibrilles à haut rendement), et nos résultats sont en accord avec les résultats de la littérature en particulier pour σ_y et ϵ_f [26, 27, 48, 61].

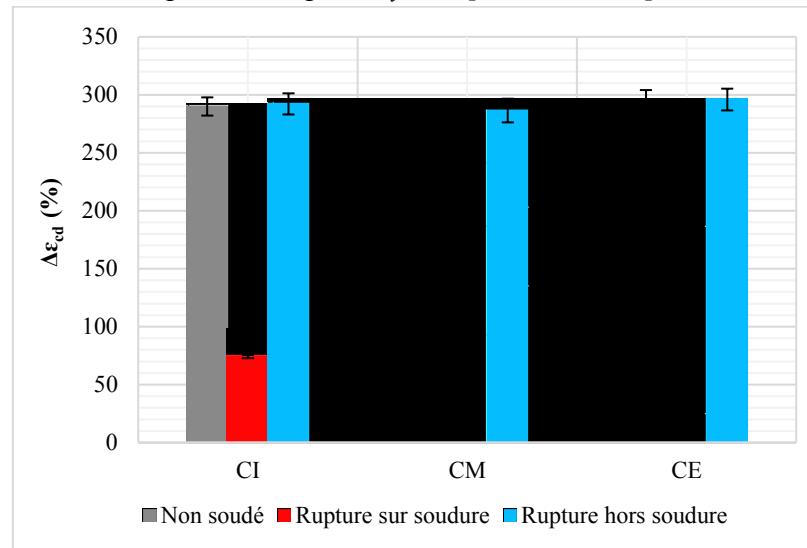


Figure.6.12 : Étendue de la variation d'étrage à froid pour différentes positions à travers la paroi du tube

Les propriétés mécaniques du matériau soudé sont en fonction des conditions dans lesquelles le soudage a été effectué, car un temps de séjour surdimensionné (chapitre 2) peut influencer défavorablement les paramètres de contrainte et de déformation [26].

Une façon d'expliquer les différences entre les propriétés mécaniques qui sont affichées sur les Figures : 6.10, 6.11 et 6.12 pourrait être la présence des sphéraulites grossières aux limites qui sont les trajectoires les plus probables suivi d'une rupture fragile [63]. Il a également été observé aussi que la taille la plus petite de la zone de fusion « MZ » se trouve au milieu de la paroi du tube et s'élargit progressivement au fur à mesure qu'elle atteint les frontières extérieures et intérieures (figure 4.1-ch.4) [29, 60, 61]. En conséquence, cette découverte est en corrélation avec notre étude dans le but d'expliquer les performances supérieures des échantillons des couche moyenne dont 0 % de rupture à la soudure par rapport aux couche interne et externe où une rupture de 23% a été observée à la soudure (tableau 6.1). Pour la caractérisation de la structure, il a été établi que la déformation élastique initiale (zone I, figures 6.5 et 6.6) est une combinaison de séparation lamellaire, de cisaillement inter-lamellaire et de rotation d'empilement lamellaire [42]. D'autre part, la littérature identifie de nombreux mécanismes de déformation plastique dans les zones II et III tels que le glissement des chaînes, la fragmentation et la cavitation des lamelles et le glissement transversal [42, 48, 50].

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale :

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier les deux méthodes de soudage des tubes enfouis en polyéthylène de haute densité (HDPE) : soudage bout-à-bout (Butt Fusion Welding, BFW) et soudage par électrofusion (EFW). La plus importante partie de l'étude traite plutôt le soudage bout-à-bout (b-à-b), quant au soudage par électrofusion on s'est contenté d'une analyse bibliographique vu les difficultés rencontrées pour l'obtention des spécimens soudés chez les fabricants.

Pour la partie soudage bout à bout deux aspects ont été abordés, le premier concerne la simulation du comportement thermique des quatre phases de soudage bout à bout du tube en HDPE en utilisant des conditions aux limites qui se rapproche plus du cas réel. L'intérêt est de mettre en œuvre un modèle numérique capable de décrire l'évolution de la température en fonction du temps durant toutes les phases de l'opération de soudage b-à-b dans les deux directions axiale et radiale. Le problème est résolu au moyen de la méthode des différences finis basée sur le schéma de la direction alternée implicite. La simulation numérique prend alors toute son importance, puisqu'une fois le code de calcul est validé à partir d'un nombre restreint d'essais, il devient théoriquement possible de prédire les caractéristiques thermiques des soudures dans n'importe quelles conditions. Ainsi en confrontant les prédictions numériques aux mesures expérimentales nous avons pu vérifier la robustesse du modèle numérique.

Dans la deuxième partie de l'étude on a développé une méthode expérimentale afin d'évaluer les propriétés mécaniques le long de la circonférence et à travers la paroi soudée bout à bout d'un tube en HDPE. La méthode compare les comportements contrainte-déformation des tubes en HDPE avec et sans joint de soudure. On peut récapituler les démarches et les résultats de l'étude comme suit :

- Une méthode expérimentale basée sur des essais mécaniques normalisés. Elle comprend cinq étapes simultanées : (i) la préparation des tubes basé sur SDR, (ii) soudage par fusion bout à bout, (iii) usinage combiné par tournage et alésage dans des conditions spécifiées, (iv) découpe d'échantillons standard, et (v) essai mécanique. Elle pourrait être utilisée pour vérifier les performances des appareils de soudage et pour détecter les faiblesses localisées dans la soudure dans les résines de polyéthylène nouvellement fabriquées.
- La méthode est appliquée avec succès pour des tubes soudés et non soudés pour un diamètre extérieur de 200 mm. Le résultat le plus important est la rupture de 23% des éprouvettes au niveau du cordon de soudure des couches internes et externes, alors qu'au

niveau des couches moyennes aucune rupture n'est observée. La rupture hors soudure est constatée au niveau de l'ensemble des couches moyennes. Cela indique que les parties les plus fragile sont ceux qui sont rapidement refroidis par l'air ambiant (phénomène de la soudure à froid). Un tel problème ne peut pas être détecté lorsque le test est réalisé sur l'épaisseur totale du tube.

- Les trois zones caractéristiques du comportement contrainte-déformation du matériau semi-cristallins sont conservés même en présence d'une soudure par fusion bout à bout. Les effets de la soudure sur les propriétés mécaniques ont été évalués. Dans la couche intérieure soudé (CIS), les propriétés E , σ_y , σ_f et σ_{cd} affichent des valeurs nettement inférieures, alors que dans les couches externes soudés (CES), la tendance est inversée.
- Les valeurs de Δ_{ecd} restent approximativement stables pour les deux types d'éprouvettes soudés et non soudés. On peut conclure que cette propriété est moins affectée par la soudure.
- L'analyse de la microstructure montre que la soudure a contribué à augmenter la cristallinité donnant plus de force d'allongement. En appliquant la méthode proposée, on constate que la cristallinité diminue pour les tubes non soudés des couches internes vers les couches externes et l'inverse est observé pour les tançons soudés. Une telle réorganisation de la structure cristalline explique la tendance des propriétés mécaniques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

- [1] Wilson D, Filion Y, Moore I (2015) “State-of-the-art review of water pipe failure prediction models and applicability to large-diameter mains”, *Urban Water Journal* 14(2):173–184.
- [2] Yu K, Morozov EV, Ashraf MA, Shankar K (2017) “A review of the design and analysis of reinforced thermoplastic pipes for offshore applications”. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*;
- [3] Deblieck RAC, van Beek DJM, McCarthy M, Mindermann P, Remerie K, Langer B, Grellmann W (2017) “A simple intrinsic measure for rapid crack propagation in bimodal polyethylene pipe grades validated by elastic–plastic fracture mechanics analysis of data from instrumented Charpy impact test”. *POLYM. ENG. SCI.*, 57:13–21, SPE
- [4] Sharma GVSS, Umamaheswara Rao R, Srinivasa Rao PS (2017) “A Taguchi approach on optimal process control parameters for HDPE pipe extrusion process”. *J. Ind. Eng. Int.* 13(2):215–228.
- [5] Han L H, Deng Y H, Liu C D (1999) “The determination of J_{IC} for polyethylene pipe using non-standard arc-shaped specimen”. *Int. J. Press. Vess. & Piping* 76:647–651
- [6] vander Stok E J W, Scholten F L (2016) “Determining the residual quality of PE pipes using the strain hardening test”. Proc. of the 18th Plastic Pipes Conf. PPXVIII, September 12–14, 2016, Berlin, Germany, 10p.
- [7] Cherief, M N D, Elmeguenni M, Benguediab M (2017) “Impact fracture toughness evaluation for high density polyethylene materials”. *J. Appl. Mech. & Techni. Phys.* 58(2):335–341.
- [8] Akkurt A (2014) “An analysis of electro-melting and hot element welding methods’ safety used to join PE natural gas pipes”. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering* 3(2):493-504
- [9] Saharudin M S, Atif R, Shyha I, Inam F (2016) “The degradation of mechanical properties in polymer nano-composites exposed to liquid media (A Review) “. *RSC Advances* 6:1076–1089

- [10] Hamlaoui N, Azzouz S, Chaoui K, Azari Z, Yallese MA (2017) “Machining of tough polyethylene pipe material: surface roughness and cutting temperature optimization”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*
- [11] Belhadi S, Kaddeche M, Chaoui K, Yallese MA (2016) “Machining optimization of high density polyethylene pipe using the Taguchi Method and Grey Relational Analysis”. *Int. Polym. Process.* 31(4):491-502
- [12] Guo S M, Yang Z G, Tang X Y, Zuo Y T (2017) “Safety assessment of high density polyethylene pipe with thermal damages”. *J. Plastics, Rubber and Composites, Macromolecular Eng.* 46(4):1743–2898
- [13] Talhi F Z, Benaniba M T, Belhaneche-Bensemra N, Massardier V (2016) “Comparison of material properties in butt welds of used and unused polyethylene pipes for natural gas distribution”, *J. Polym. Eng.* 37(3): 279-285.
- [14] ASTM Standard D 638–02a (2002) Standard test method for tensile properties of plastics (metric), Annual Book of ASTM Standards
- [15] Hehn O (2006) “Analyse expérimentale et simulation thermomécanique du soudage bout à bout de tubes de polyéthylène”. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 196p.
- [16] BS ISO 4427–2 (2007) British standard, “Plastic piping system—polyethylene (PE) pipes and fittings for water supply”—part 2: pipes;
- [17] Chebbo Z (2013) “Etude numérique et expérimentale du soudage par électrofusion de tubes en polyéthylène“. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 206p.
- [18] ISO12176–3 (2003) “Plastics pipes and fittings—equipment for fusion jointing polyethylene systems—part 1: Butt fusion”
- [19] Wolters M, Venema B, (1987) “Le soudage bout à bout des tubes de polyéthylène ”.4 :213,
- [20] Plastics Pipe Institute (2008), “Handbook of Polyethylene Pipe ”, 2nd Edition.
- [21] http://www.groupechiali.com/images/documentation/manuels_de_pose/man_bout_à_bout, Accessed Sept. 10 2017
- [22] J. Bowman. (1997) “A review of the electrofusion joining process for polyethylene pipe systems”. *Polymer Engineering and Science.* 37(4):674

- [23] Nussbaum M, Dufour D, Gueugnaut D (1991) "Electrofusion of polyethylene: how and why". Proceedings of the 12th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, pp.324, Boston (MA, USA), September 24-26.
- [24] ASTM F2620-06 (2006) "Standard practice for heat fusion joining of polyethylene pipe fittings" ASTM International.
- [25] Atkinson J R, Barber P (1972) "Some microstructural features of the welds in butt-welded polyethylene and polybutene-1 pipes". *J Mater Sci* 7:1131–1136
- [26] Pokharel P, Kim Y, Choi S (2016) "Microstructure and mechanical properties of the butt joint in high density polyethylene pipe". *Int J Polym Sci*, 13p
- [27] Shaheer M, Troughton M, Khamsehnezad A, Song J (2017) "A study of the micro-mechanical properties of butt fusion-welded joints in HDPE pipes using the nano-indentation technique". *Weld World* 61:819–831.
- [28] Galchun A, Korab N, Kondratenko V, Demchenko V, Shadrin A, Anistratenko V, Iurzhenko M (2015) "Nanostructurization and thermal properties of polyethylenes welds". *Nanoscale Res Lett* 10:138.
- [29] Riahia M, Kooshayana K, Faraji Ghanatia M (2011) "Analysis of Effect of Pressure and Heat on Mechanical Characteristics of Butt Fusion Welding of Polyethylene Pipes", *Polymer-Plastics Technol. & Eng.*, 50 (9), 907-915.
- [30] Chen H, Scavuzzo R J, Srivatsan T S (1997) "Influence of joining on the fatigue and fracture behavior of high density polyethylene pipe", *J. Mater. Eng. & Performance*, 6 (4), 473-480
- [31] Zhao J, Daigle Q, Beaulieu L (2002) "Effect of joint contamination on the quality of butt-fused HDPE pipe joints", NRCC-45337, *Canadian J. of Civil Eng.*, 29 (5), 787-798.
- [32] Alimi L, Chaoui K, Ghabeche W, Chaoui W (2013) "Short-term HDPE pipe degradation upon exposure to aggressive environments" *Mater Tech* 101:701.
- [33] Ghabeche W, Alimi L, Chaoui K (2015) "Degradation of plastic pipe surfaces in contact with an aggressive acidic environment". *Int. Conf. Technol. & Mater for Renew Energy, Envir. & Sustainability. Energy Procedia* 74:351–364.
- [34] Rehab-Bekkouche S, Ghabeche W, Kaddeche M, Kiass N, Chaoui K (2009) "Mechanical behaviour of machined polyethylene filaments subjected to aggressive chemical environments" *Mechanika (MECHANICS)* 77(3):40–46
- [35] Alimi L, Ghabeche W, Chaoui W, Chaoui K (2012) "Étude des propriétés mécaniques à travers la paroi d'un tube HDPE-80 extrudé destiné à la distribution du gaz naturel". *Matér Tech* 100(1):79–86.

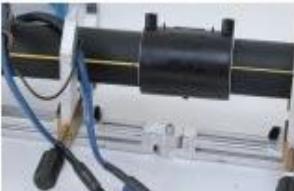
- [36] Munns I J, Georgiou G A (1995) "Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welds in polyethylene pipe", Plastic Pipes IX, Heriot-Watt University.
- [37] Gueugnaut D, Wackernie P, Forgerit J P (1988) "Infrared microspectrometric of the thermal history of fusion welding of polyethylene". Journal of Applied Polymer Science. 35:1683
- [38] Hagglund F, Spicer M A, Troughton M J (2012) "Phased Array Ultrasonic Testing of Welded Joints in Plastic (PE) Pipes", 6th Middle East Nondestructive Testing Conference, 7-10 Oct, Kingdom of Bahrain
- [39] Crawford S L, Doctor S R, Cinson A D, Cumblidge S E, Anderson M T (2009) "Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion" presented at the proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2009(PVP2009), Prague, Czech Republic, July 26-30
- [40] Gueugnaut D, Tessier M, Bouaffre R, Lopitaux A (2017) "Ultrasonic phased array inspection of electrofused joints implemented in polyethylene gas piping systems". J Mater Sci Eng A 7(3-4):68-81.
- [41] Stakenborghs R, Little J (2009) "Microwave based NDE inspection of HDPE pipe fusions" presented at the Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE17, Brussels, Belgium, July 12-16.
- [42] Barber P, Atkinson JR (1974) "The use of tensile tests to determine the optimum conditions for butt fusion welding certain grades of polyethylene, polybutene-I and polypropylene pipes" J Mater Sci 9:1456-1466
- [43] Shillitoe S, Day AJ, Benkreira H (1990), A finite element approach to butt fusion welding analysis, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, (204), 95-101
- [44] Benkreira H, Shillitoe S (1990) "Modelling of the butt fusion welding process", chemical Engineering Science, (46), 135-142
- [45] Wood A S (1993) "The butt-fusion welding of polymers" Chemical Engineering Science. Volume 48.
- [46] Starostin N P, Ammosova O A (2009) "Thermal Processes in Butt-Welding Polyethylene Pipe at Low Ambient Temperatures" Russian Engineering Research, 2009, Vol. 29,
- [47] Starostin N P, Ammosova O A (2016) "Simulation of the thermal process of butt welding of polyethylene pipes at low temperatures", Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 89(3), 714-720
- [48] Leskovics K, Kollár M, Bárczy P (2006) "A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes" Mater. Sci. & Eng. A, 419:138-143

- [49] Jagtap T U, Mandave H A (2015) “Machining of plastics: a review”. *Int J Eng Res Gen Sci* 3(Part 2):577–581
- [50] Kiass N, Khelif R, Boulanouar L, Chaoui K (2004) “Experimental approach to mechanical property variability through a high-density polyethylene gas pipe wall”. *J Appl Polym Sci* 97: 272–281
- [51] Kaddeche M, Chaoui K, Yallese MA (2012) “Cutting parameters effects on the machining of two high density polyethylene pipes resins” *Mech Ind* 13:307–316.
- [52] ISO 11357-1.2 Plastiques - Analyse calorimétrique différentielle (DSC)
- [53] Matthieu Z, Zakariaa R, Boutaous M, Xin S, Bourgin P (2013) “Thermophysical Characterization and Crystallization kinetics of semi-crystalline polymers”, *journal of modern physics*, 4, 28-37
- [54] Lach, R., Hutař, P., Veselý, P., Nezbedová, E., Kněsl, Z., Koch, T., ... Grellmann, W. (2013). Assessment with indentation techniques of the local mechanical behavior of joints in polymer parts. *Polimery/Polymers*, 58(11–12), 900–905.
- [55] <https://www.cnrs.fr/> Accessed Dec. 2016
- [56] Stokes V K. (1998) “Experiments on the hot-tool welding of three dissimilar thermoplastics”. *Polymer*. 39 :2469.
- [57] Cheniguel A (2014) Numerical Method for the Heat Equation with Dirichlet and Neumann Conditions, *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*. Vol I, IMECS, March 12 - 14, 2014, Hong Kong.
- [58] Shan Zhao (2014) “A matched alternating direction implicit (ADI) method for-solving the heat equation with interfaces”, *math.NA*, 1-31
- [59] Liu J, Zheng Z (2013), “IIM-based ADI finite difference scheme for nonlinear convection–diffusion equations with interfaces” *Applied Mathematical Modelling* 37, 1196–1207
- [60] Mikula J, Hutař P, Nezbedová E, Lach R, Arbeiter F, Ševčík M, Pinter G, Grellmann W, Náhlíka L (2015) “On crack propagation in the welded polyolefin pipes with and without the presence of weld beads”. *Mater Des* 87:95–104.
- [61] Decourcy D R, Atkinson J R (1977) “The use of tensile tests to determine the optimum conditions for butt welding polyethylene pipes of different melt flow index”. *J. of Mater. Sci.*, 12 (8), 1535-1551
- [62] Dai H, Peng J (2017) The effects of welded joint characteristics on its properties in HDPE thermal fusion welding. *Mod Phys Lett B* 31(15):1750185:1–11..
- [63] Tariq F, Nausheen Naz N, Khan M A, Baloch RA (2012) “Failure analysis of high density polyethylene butt weld joint” *J Fail Anal Prev* 12:168–180

- [64] Lee B-Y, Kim J-S, Lee S-Y, Kim YK (2012) Butt-welding technology for double walled polyethylene pipe. *Mater Des* 35:626–632
- [65] H. Zuidema, G. W. M. Peters and H. E. H. Meijer, *Macromolecular Theory and Simulations*, Vol. 10, 2001, pp. 447-460.
- [66] Niou S, Azzouz S, Chaoui K, Azari Z (2016) “ Développement d'une méthode pour caractériser la résistance mécanique circonférentielle d'un joint de tube plastique soudé bout-à-bout”, 10èmes Journées de Mécanique (JM'10, EMP), Ecole Militaire Polytechnique, 12-13 April, Algiers, 1–5
- [67] Parant O (2002) “Étude expérimentale et calcul des contraintes résiduelles dans des tubes extrudés en polyéthylène”. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris 194p.
- [68] Humbert S, (2009) “Influence de la topologie moléculaire et de la microstructure sur les propriétés mécaniques des Polyéthylènes”, Thèse, Université INSA de Lyon.
- [69] KIASS N, CHAOUI K (2004) “Caractérisation expérimentale des déformations résiduelles dans les tubes en polyéthylène de haute densité”. *Sciences & Technologie B* – N°22 79-85.
- [70] El-Bagory T M A A, Younan M Y A, Sallam H E M (2013) “Mechanical behavior of welded and un-welded polyethylene pipe materials”, KPVP Conference, Proc. of the ASME, Pressure Vessel & Piping Division, Paper-97743, Paris 14–18/07/13

ANNEXES

Annexe 1 : Mode opératoire du soudage par électrofusion :

<p>Etape 1 : coupage et marquage</p> <ul style="list-style-type: none"> - Couper les tubes à joindre orthogonalement à l'axe et nettoyer les traces de terre et de boue du tube sur au moins 500 mm en partant des extrémités. - Marquer la longueur d'introduction en approchant le raccord enveloppé à côté du tube. 	
<p>Etape 2 : Grattage</p> <ul style="list-style-type: none"> - À l'aide d'un racleur manuel ou mécanique, retirer uniformément la pellicule superficielle des tubes ; - Veiller à enlever tout déchet éventuel de PE. 	
<p>Etape 3 : épaisseur d'introduction</p> <ul style="list-style-type: none"> - Extraire le raccord du sachet en plastique en évitant de toucher la surface intérieure. - Introduire le raccord sur le premier tronçon de tube jusqu'à la butée et marquer la profondeur d'introduction avec un feutre indélébile. - Enlever le raccord du premier tronçon de tube et répéter l'opération sur le deuxième tronçon de tube 	
<p>Etape 4 : alignement</p> <ul style="list-style-type: none"> - Introduire l'aligneur sans serrer les mâchoires. - Introduire le raccord électro-soudable en veillant à ce qu'il soit centré par rapport à l'aligneur et que les extrémités des tubes soient introduites correctement dans le raccord jusqu'à la ligne marquée - Serrer les mâchoires de l'aligneur/positionneur. - Tourner légèrement le raccord en veillant à ce que les tubes soient alignés. 	
<p>Etape 5 : soudage</p> <ul style="list-style-type: none"> - Enlever les couvercles des terminaux du raccord. - Brancher les broches aux terminaux du raccord. - Introduire les données du raccord (diamètre, temps de fusion et de refroidissement) dans la machine à souder. - Si vous utilisez une machine polyvalente, il est suffisant de passer le crayon optique sur le code à barres quand elle le demande. - Appuyer sur la touche de mise en marche et s'assurer que le cycle de fusion s'accomplit 	
<p>Etape 6 : répétition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Une fois le cycle de réchauffement terminé, les indicateurs de fusion devraient avoir monté. - Si cela ne s'est pas produit, il faudra enlever le raccord en coupant les tubes et commencer une nouvelle jonction. - Attendre le temps de refroidissement est empilé sur le raccord - Enlever les broches d'alimentation et l'aligneur/positionneur. 	

Annexe 2 : Mode opératoire du soudage bout à bout :

<p>Etape 1 : Positionnement des éléments à souder :</p> <p>Installer, extrémité contre extrémité et fixer les tubes à souder dans les mors de serrage afin d'éviter tout glissement. Après le serrage des mors, l'équipage mobile amorce une fermeture complète. Une fois la mesure de pression effectuée, la machine vous demande de positionner le rabot.</p>	
<p>Etape 2 : Rabotage :</p> <p>Le rabotage permet d'assurer la propreté de la surface à souder avec l'enlèvement d'une couche de matière du PE qui se trouve aux extrémités des tubes à souder. Retirer la totalité des copeaux dus au rabotage, dans la machine et les tubes et ne pas toucher les sections rabotées.</p>	
<p>Etape 3 : Centrage et alignement :</p> <p>Effectuer un contrôle de l'alignement, tout décalage supérieur de l'épaisseur n'est pas conforme et nécessite un réajustement des mors de serrage. Dans ce cas recommencer l'opération de rabotage.</p>	
<p>Etape 4 : Nettoyage du tube PE :</p> <p>Après l'alignement, procéder au nettoyage des extrémités des tubes avec un chiffon solvant, tel que recommandé par les fabricants des tubes.</p>	
<p>Etape 5 : Soudage</p> <p>L'opération de soudage est divisé en quatre phase, pendant le cycle, la machine contrôle les phases d'égalisation et de chauffage, d'éjection de l'élément chauffant et de montée en pression et de soudage</p>	
<p>Etape 6 : Refroidissement</p> <p>L'étape de refroidissement à l'air libre est la quatrième phase du cycle de soudage. Pendant toute la durée de soudage et de refroidissement, l'assemblage ne doit absolument pas être démonté ou soumis à des contraintes externes.</p>	

Annexe 3 : Présentation générale de la méthode de la direction alternée implicit « ADI »

Equation de la conduction en coordonnées cylindriques :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$t > 0$$

$$r_i < r < r_e$$

$$z > 0$$

Discrétisation à partir de la méthode ADI :

Prédiction :

- *Système*

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{(i,j)}^{k+1/2} - T_{(i,j)}^k}{\frac{\Delta t}{2}}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{i \Delta r} \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{(i+1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i-1,j)}^k}{\Delta z^2}$$

$$\frac{T_{(i,j)}^{k+1/2} - T_{(i,j)}^k}{\frac{\Delta t}{2}} = a \left(\frac{1}{r} \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1/2} - T_{(i-1,j)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)} + \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i-1,j)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{(i,j+1)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i,j-1)}^k}{\Delta z^2} \right)$$

$$A1 T_{(i-1,j)}^{k+1/2} + A2 T_{(i,j)}^{k+1/2} + A3 T_{(i+1,j)}^{k+1/2} = A4 T_{(i,j-1)}^k + A5 T_{(i,j)}^k + A6 T_{(i,j+1)}^k$$

- *Coefficients*

$$A1 = \frac{a \Delta t}{2} \left(\frac{1}{2r \Delta r} - \frac{1}{\Delta r^2} \right) ,$$

$$A2 = 1 + \frac{a \Delta t}{\Delta r^2} ,$$

$$A3 = -\frac{a \Delta t}{2} \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r \Delta r} \right) ;$$

$$A4 = \frac{a \Delta t}{2 \Delta z^2}$$

$$A5 = 1 - \frac{a \Delta t}{\Delta z^2} ;$$

$$A6 = \frac{a.\Delta t}{2.\Delta z^2}$$

Correction:

- *Système*

$$\frac{T_{(i,j)}^{k+1} - T_{(i,j)}^{k+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta t}{2}} = a \left(\frac{1}{r} \frac{T_{(i+1,j)}^{k+\frac{1}{2}} - T_{(i-1,j)}^{k+\frac{1}{2}}}{2(\Delta r)} + \frac{T_{(i+1,j)}^{k+\frac{1}{2}} - 2T_{(i,j)}^{k+\frac{1}{2}} + T_{(i-1,j)}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i,j-1)}^{k+1}}{\Delta z^2} \right)$$

$$B1 \ T_{(i,j-1)}^{k+1} + B2 \ T_{(i,j)}^{k+1} + B3 \ T_{(i,j+1)}^{k+1} = B4 \ T_{(i-1,j)}^{k+1/2} + B5 \ T_{(i,j)}^{k+1/2} + B6 \ T_{(i+1,j)}^{k+1/2}$$

- *Coefficients*

$$B1 = -\frac{a.\Delta t}{2.\Delta z^2} ;$$

$$B2 = 1 + \frac{a.\Delta t}{\Delta z^2} ;$$

$$B3 = -\frac{a.\Delta t}{2.\Delta z^2} ;$$

$$B4 = \frac{a.\Delta t}{2} \left(\frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r\Delta r} \right) ;$$

$$B5 = 1 - \frac{a.\Delta t}{\Delta r^2} ;$$

$$B6 = \frac{a.\Delta t}{2} \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r\Delta r} \right)$$

Remarque :

Le système obtenu donne des matrices tri diagonales qui seront résolus à partir de l'algorithme de Thomas. Le schéma de la direction alternée implicite n'est pas concerné par l'étude de stabilité, il est inconditionnellement stable.

Annexe 4 : Récapitulatif de la distribution de la température dans les quatre phases du soudage bout à bout pour différent nœuds

