

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR UNIVERSITY OF ANNABA
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي
مختار عنابة

Ann ée : 2015

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**ETUDE THERMIQUE DU SOUDAGE BOUT A BOUT DE TUBE
EN POLYETHYLENE A HAUTE DENSITE**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUE
FILIERE : GENIE MECANIQUE
SPECIALITE : ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR : **M^r CHAIBI IDRIS**

DIRECTEUR DU MEMOIRE : **D^r S. AZZOUZ**

DEVANT LE JURY :

PRESIDENT : P^r H.MZAD

EXAMINATEURS : M^{CB} F.MCHIGHEL

M^{CA} A.HAOUAM

M^{CA} R.ADJABI

Table des matières

<u>TABLE DES MATIERES</u>		<i>page</i>
DÉDICACES		I
REMERCIEMENTS		II
NOMENCLATURE		III
LISTE DES FIGURES		IV
INTRODUCTION GENERALE		1
<i>CHAPITRE II : DESCRIPTION GENERAL DU SOUDAGE BOUT A BOUT</i>		
Chapitre 1	I.1 Introduction	2
	I.2 Caractéristiques de la matière PE	2
	I.2.1 Origine du polyéthylène	2
	I.2.2 Choix des résines	3
	I.3 Caractéristiques du tube PE	3
	I.3.1 Résistance à la propagation rapide des fissures	3
	I.3.2 Résistance à l'abrasion	4
	I.3.3 Résistance chimique	4
	I.3.4 Corrosion	4
	I.4 Les applications des tubes PE	5
	I.4.1 La distribution d'eau potable	5
	I.4.2 La distribution de gaz	5
	I.4.3 L'assainissement sous pression	6
	I.4.4 Le dessalement de l'eau de mer	6
	I.4.5 Les réseaux anti-incendie	6
	I.5 Méthode de fabrication (extrusion)	7
	I.6 Les avantages du polyéthylène	7
	I.7 Raccordement des tubes en PE	8
	I.7.1 Electro soudage	8
	I.7.1.1 Principe de la technique	8
	I.7.1.2 Equipement	9
	I.7.2 Soudage bout à bout	10
	I.7.2.1 Description générale	10
	I.7.2.2 Machines à souder «bout à bout»	10
	I.7.2.3 Les étapes principales du soudage bout à bout	11
	I.7.2.4 Les bourrelets de soudure	12
I.7.2.5 Avantages de soudage bout à bout	13	
I.7.3 Contrainte par rapport à l'électrosoudage	13	
<i>CHAPITRE II : ANALYSE NUMERIQUE DU TRANSFERT THERMIQUE</i>		
II.1. Généralités sur les transferts de chaleur	14	
II.1.1 Introduction	14	
II.1.2 Définitions	14	
II.1.2.1 Champ de température	14	
II.1.2.2 Gradient de température	14	
II.1.2.3 Flux de chaleur	15	
II.1.3 Formulation d'un problème de transfert de chaleur	15	
II.1.3.1 Bilan d'énergie	15	
II.1.3.2 Expression des flux d'énergie	16	
II.1.3.2.1 Conduction	16	

Chapitre 2	II.1.3.2.2 Convection	17
	II.1.3.2.3 Rayonnement	17
	II.1.4 Equation de la Chaleur	18
	II.1.4.1 Equation de la chaleur en coordonn ées cart ésiennes	18
	II.1.4.2 Equation de la chaleur en coordonn ées cylindriques	19
	II.1.4.3 Equation de la chaleur en coordonn ées sph ériques	19
	II.2 M éthode des diff érences finis	19
	II.2.1 Introduction	19
	II.2.2 Les équations aux d ériv ées partielles (EDP)	20-21
	II.2.3 Principe de la m éthode des diff érences finies	22
	II.2.3.1 Les sch émas num ériques	22
	II.2.3.1.1 Sch éma explicit	22-23
	II.2.3.1.2 Sch éma implicite	24
	II.2.3.1.3 Sch éma de Crank-Nickolson	24
	II.2.3.1.4 Sch éma de la Direction altern ée implicite (ADI)	25-26
	II.2.4 Conclusion	26
CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION THERMIQUE DU SOUDAGE BOUT A BOUT		
Chapitre 3	III.1 Introduction	27
	III.2 Bibliographie concernant la mod éisation du soudage Bout àBout	27
	III.3 Description du proc édé	28
	III.4 G éométrie et domaine d'étude	28
	III.5 Hypoth èses	29
	III.6 Propri étés du matériau	29
	III.7 Mod éisation math ématique	30
	III.7.1 Mod èle thermique	30
	III.7.2 Les Conditions aux limites	30
	III.8 Discr éisation par la m éthode des Diff érences Finies	31
	III.8.1 Sch éma de Cranck & Nicolson	31
	III.8.1.1 Discr éisation de l'équation	31
	III.8.1.2 condition de stabilit é	32
	III.8.1.3 Discr éisation des conditions aux limites	33
	III.8.2 Sch éma de la direction altern ée implicite (ADI)	33
	III.8.2.1 Discr éisation de l'équation	33-34-35
	III.9 R ésultats de la simulation	36
	III.9.1. Distribution de la temp érature dans la longueur du tube	36
	III.9.1.1 Variation de la temp érature initiale	36
	III.9.1.2 Variation de la temp érature de la plaque chauffante	37
	III.9.2 Distribution de la temp érature dans l'épaisseur du tube	38
	III.9.2.1 Variation de la temp érature initiale	38
	III.9.2.2 Variation de la temp érature de la plaque chauffante	39
III.9.2.3 distribution de la temp érature dans plusieurs nœuds	39	
III.9.3 Distribution de la temp érature en fonction du temps aux nœuds r et z	40	
III.9.4 Validation de cette partie d'étude à partir du résultat de M..O.HEHN	41	
III.9.5 Repr ésentation graphique en 3D	42	
CONCLUSION GENERALE		43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIES		44-45



Dédicaces

A :

 *Ma mère ;*

 *Mon père ;*

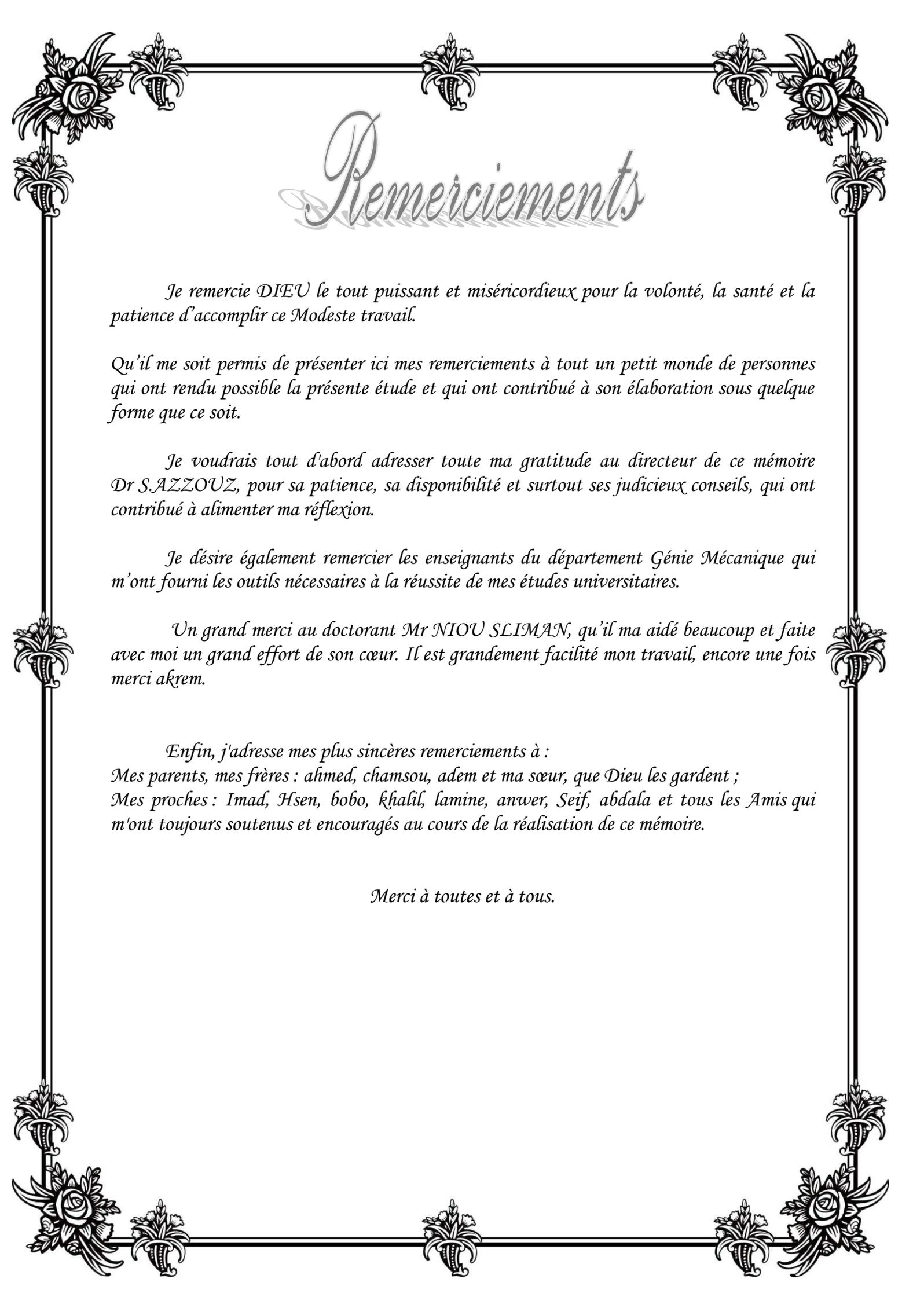
 *Ma sœur, et Mes frères.*

 *Tous mes proches ;*

 *Mes collègues et à mes amis sans exception.*

 *Tous ceux qui m'ont aidé et encouragé.*

Je dédie ce mémoire



Remerciements

Je remercie DIEU le tout puissant et miséricordieux pour la volonté, la santé et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Qu'il me soit permis de présenter ici mes remerciements à tout un petit monde de personnes qui ont rendu possible la présente étude et qui ont contribué à son élaboration sous quelque forme que ce soit.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude au directeur de ce mémoire Dr S.AZZOUZ, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire également remercier les enseignants du département Génie Mécanique qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Un grand merci au doctorant Mr NIOU SLIMAN, qu'il m'a aidé beaucoup et faite avec moi un grand effort de son cœur. Il est grandement facilité mon travail, encore une fois merci akrem.

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à :
Mes parents, mes frères : ahmed, chamsou, adem et ma sœur, que Dieu les gardent ;
Mes proches : Imad, Hsen, bobo, khalil, lamine, anwer, Seif, abdala et tous les Amis qui m'ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.*

Merci à toutes et à tous.

Nomenclature

Nomenclature

PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène Basse Densité
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
\vec{n}	vecteur unitaire de la normale
ϕ	flux de chaleur [$W m^{-2}$]
ϕ_{st}	flux de chaleur stocké [w]
ϕ_g	flux de chaleur généré [w]
ϕ_e	flux de chaleur entrant [w]
ϕ_s	flux de chaleur sortant [w]
λ	Conductivité thermique du tube [$W/m K$]
x	Variable d'espace dans la direction du flux [m]
S	surface [m^2]
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection [$W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$]
T_p	Température de surface du solide [$^\circ C$]
T_∞	Température du fluide loin de la surface du solide [$^\circ C$]
σ	Constante de Stephan [$5,67.10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$]
ϵ_p	Facteur d'émission de la surface
r_i	Rayon intérieur [m]
R_e	Rayon extérieur [m]
Z	Longueur du tube [m,
θ	Température du Tube (pipe), [$^\circ C$]
θ_0	Température initial, [$^\circ C$]
θ_a	Température de l'air, [$^\circ C$]
θ_p	Température de la plaque chauffante, [$^\circ C$]
P	Masse volumique du polyéthylène [kg/m]
C	Chaleur spécifique de HDPE [j/kg k]
T	Temps [s]
T_{eg}	Temps de la phase d'égalisation [s]
T_{Ch}	Temps de la phase de chauffage [s]
N_r	Nœuds radiales
N_z	Nœuds axiaux
Δr	Pas d'espace suivant r
Δz	Pas d'espace suivant z
Δt	Pas du temps
l	Incrément d'espace suivant r
J	Incrément d'espace suivant z
K	Exposant du temps

Liste des figures

Liste des figures

I.1	La molécule polyéthylène
I.2	Contrainte sur le Tube PE
I.3	Tube d'eau potable (Marqué en bleu)
I.4	Tube de gaz (Marqué en jaune)
I.5	Tubes PEHD dans le dessalement de l'eau de mer
I.6	Fabrication du tube
I.7	L'électrosoudage
I.8	Equipement de l'électrosoudage
I.9	Plaque chauffante
I.10	Machine à souder bout à bout
I.11	Equipements du soudage bout à bout
I.12	Les 4 phases de soudage
I.13	Diagramme temps – pression – température
I.14	Bourrelet de soudage
II.1	Isotherme et gradient thermique
II.2	Bilan d'énergie
II.3	Représentation schématique du phénomène de conduction
II.4	Transfert thermique par convection
II.5	Transfert thermique par rayonnement
II.6	Schéma explicite
II.7	Schéma implicite
II.8	Schéma de Crank-Nicolson
II.9	Schéma ADI
III.1	Géométrie utilisée pour la simulation (vue en perspective d'une partie du tube)
III.2	Géométrie utilisée pour la simulation (vue en 3D)
III.3	Schéma numérique de Crank & Nicolson
III.4	Schéma numérique de la direction alternée implicite
III.5	Distribution de la température dans la longueur du tube avec variation de la température initiale
III.6	Distribution de la température dans la longueur du tube avec variation de la température de la plaque
III.7	Distribution de la température dans l'épaisseur du tube avec variation de la température initiale
III.8	Distribution de la température dans l'épaisseur du tube avec variation de la température de la plaque.
III.9	Distribution de la température dans l'épaisseur au plusieurs nœuds
III.10	Variation de la température dans le temps à l'interface miroir/Tube au nœuds(r,z) pour les 25s de la phase d'égalisation
III.11	Variation de la température dans le temps à l'interface miroir/Tube au nœuds(r,z) pour les (25s (égalisation) et 175s (chauffage)
III.12	Validation de notre résultat avec le résultat expérimental de M.O.HEHN
III.13	Représentation graphique en 3D

Introduction g é n é r a l e

INTRODUCTION GENERALE

Les réseaux de canalisations enterrés et construits en polyéthylène 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. Le choix porté du polyéthylène dans les réseaux de canalisation, réside dans les avantages qu'offre ce type de matériau. Effectivement, Les tubes en polyéthylènes sont des matériaux légers, ce qui réduit les frais de manutentions, ils sont aussi résistants à la corrosion et supportent les vibrations dus aux mouvements du sol ainsi que les perturbations et les variations de températures. Leur durée de vie est estimée à plus de 50 ans. Pour joindre deux tubes en polyéthylène de nombreux procédés ont été développés, ils diffèrent par la manière dont la chaleur est appliquée et à l'équipement utilisé. Cela se fait en usant de la chaleur pour faire fondre le HDPE 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 leur environnement. Dans la présente étude on s'intéresse au soudage bout à bout, qui consiste à faire fondre les extrémités de deux tubes au moyen d'une plaque chauffante, appelée miroir. Plus particulièrement c'est l'aspect thermique dans les deux phases de soudage bout à bout, égalisation et chauffage, qui emporte dans cette étude. On les considère comme une seule phase. Numériquement, on a utilisé pour la résolution du problème tout d'abord la méthode des différences finies schéma pondéré qui utilise la moyenne arithmétique implicite et explicite pour arriver à des conditions stables, puis compte tenu des difficultés rencontrées qui seront citées en détail dans le mémoire, nous avons recours à la méthode implicite de direction alternée. Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à la description générale du soudage bout à bout, en commençant par l'origine du polyéthylène, sa composition, et en traitant les caractéristiques des tubes PE par la présentation des différentes résistances et infection. Et en présentant aussi les applications courantes des tubes PE. On trouve aussi dans ce chapitre les principales techniques d'assemblage des tubes en PE et on a fait ressortir les étapes du soudage bout à bout, objet de notre étude. Le second chapitre, est dédié aux phénomènes du transfert thermiques et les méthodes numériques qui servent à résoudre les équations aux dérivées partielles tels que l'équation de chaleur, ainsi nous avons fait un balayage des différentes méthodes, dont nous aurons besoin, dans le traitement du soudage bout à bout. Le dernier chapitre est réservé à la modélisation du soudage bout à bout des tubes en PE. On commence par la présentation des démarches suivies pour la résolution du problème de soudage en PE, puis on expose les résultats de l'étude.

Chapitre I

Description g é n é r a l d u soudage bout à bout

I.1 Introduction :

Ce chapitre est traité à la procédure du soudage bout à bout du tube en polyéthylène nous avons développé les déférentes méthodes existantes permettant de réalisé un tel procédé à travers cette étude nous introduisons les phénomènes physique et les aspects technologiques cohérent au soudage bout à bout afin d'entamé dans les chapitres qui suivent la mod sation liée à cette opération.

I.2 Caractéristiques de la matière PE :

I.2.1 Origine du polyéthylène :

Les procédés Basse Pression permettent d'obtenir des chaines macromoléculaires linéaires plus facilement cristallisables. Le polyéthylène plus cristallin que le PEBD, donc plus dense, est appelé Polyéthylène Haute Densité (PEHD).

Le polyéthylène est produit par polymérisation des molécules d'éthylène. La matière de base servant à la fabrication des produits en polyéthylène est un granulé que l'on obtient à partir de dérivés de naphte mis sous haute pression et haute température afin d'extraire l'éthylène.

Le polyéthylène fait partie de la famille des plastiques, d'origine pétrochimique et plus précisément de la famille des polyoléfines. On appelle polyoléfines, les matériaux résultant de la polymérisation d'oléfines, c'est- dire de monomères hydrocarbonés insaturés.

Plus particulièrement, les polyéthylènes sont issus de la polymérisation de l'éthylène gazeux et sont de natures déférentes suivant les modes de polymérisation.

Le procédé "Haute Pression" conduit à un polyéthylène comportant des ramifications et donc difficilement cristallisable. On le nommera Polyéthylène Basse Densité (PEBD).

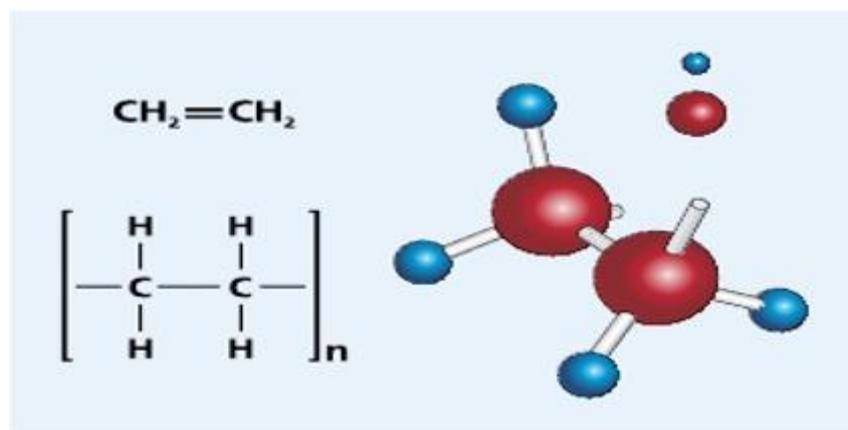


Figure I.1 : La molécule polyéthylène

I.2.2 Choix des résines :

La plus importante propriété des tubes thermoplastiques est leur résistance hydrostatique, qui définit la durée de vie attendue du tube sous pression interne. Celle-ci est liée au type de résine considérée.

C'est également à partir de la connaissance de la résistance hydrostatique à long terme d'une résine que sera calculée le dimensionnement des tubes, en fait l'épaisseur de leur paroi, pour permettre le fonctionnement en toute sécurité de la canalisation.

En pratique, on cherche d'abord à déterminer la contrainte circonférentielle induite dans la paroi d'un tube soumis à une pression P . Cette valeur est obtenue lors de l'essai à la pression hydraulique, qui consiste à immerger des éprouvettes de tubes dans des bains d'eau maintenues à des températures différentes (20  C, 40  C, 60  C et 80  C).

Cette valeur est communément appelée Minimum Required Strength (MRS) ou "contrainte minimale requise". Elle est exprimée en mégapascal (MPa)

En appliquant à la valeur du MRS un coefficient de sécurité égal à 1.25 pour l'eau, on définit une contrainte de référence de la résine, appelée aussi contrainte hydrostatique calculée à long terme. Cette valeur est généralement appelée "sigma" (σ). Elle garantit une durée de vie minimale de 50 ans pour des tubes sous pression transportant l'eau à 20  C.

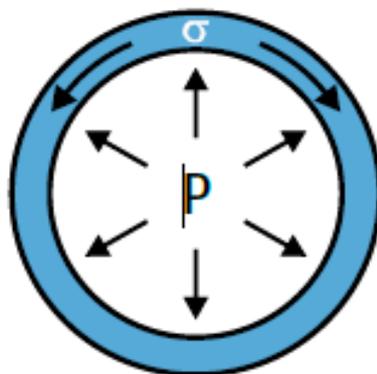


Figure I.2 : Contrainte sur le Tube PE

I.3- Caractéristiques du tube PE :

I.3.1 Résistance à la propagation rapide des fissures :

La propagation rapide des fissures est un phénomène caus e par un choc sur un tube sous pression. Cette résistance est définie par le test RCP (Rapid Crack Propagation). Ce test démontre une tenue du PE 100 jusqu'à 10 fois supérieurs à celle d'un tube en PE 80, et nettement meilleure que celle obtenue avec des matériaux métalliques, tel que l'acier par exemple.

I.3.2 Résistance à l'abrasion :

La surface paraffinique du polyéthylène lui assure un faible coefficient de friction. Les tubes en polyéthylène ont ainsi une excellente résistance à l'abrasion.

Par rapport aux autres tubes traditionnellement utilisés dans le domaine du transport de l'eau, l'utilisation de tubes en polyéthylène permet d'augmenter considérablement la durée de vie des canalisations vis- vis de l'abrasion.

Les conduites peuvent être utilisées dans de nombreux cas où l'abrasion est un problème important (transport d'eaux chargées en sable ou en gravier).

I.3.3 Résistance chimique :

Les tubes PEHD ont une bonne tenue chimique pour les cas les plus courants. Ils résistent aux sels, aux acides et aux alcalis en solutions aqueuse diluées. De nombreux solvants peuvent être acceptés jusqu'à 50  C.

La résistance chimique des tubes en polyéthylène dépend des paramètres suivants :

- ✓ Le milieu,
- ✓ La concentration de l'effluent,
- ✓ La température,
- ✓ La charge.

Le polyéthylène possède l'une des meilleures tenues chimiques de l'ensemble des matières synthétiques. Il présente l'avantage d'avoir une bonne tenue au H₂S et résiste généralement très bien dans des gammes importantes de concentration et de température, aux acides, aux eaux usées (ménagères ou industrielles).

I.3.4 Corrosion :

Le PE est inerte chimiquement, pour pratiquement tous les usages, à l'intérieur de sa plage de température d'utilisation. Il est imputrescible, il ne rouille pas, ne se pique pas, ne se corrode pas. De ce fait, son épaisseur n'est modifiée par aucune corrosion chimique ou électrique provenant du milieu environnant.

La résistivité des terrains, quel que soit son niveau, n'a pas d'effet sur les tubes et les raccords constituant le réseau en polyéthylène.

De même, il est totalement inerte vis- vis des courants électriques vagabonds générés par l'activité des transports en commun ou par les industries. Les réseaux PE installés supportent sans conséquences l'exploitation d'un réseau tramway.

I.4 Les applications des tubes PE [26] :

Depuis leurs premières applications industrielles dans les années 60, le succès des tubes PEHD n'a pas  d menti.

Leur développement ne cesse de croître et leurs domaines d'applications ne cessent de s'étendre.

Les efforts d'innovation consentis depuis, pour améliorer la matière polyéthylène et partant ses performances, ont  t d cisifs dans le choix des professionnels. Le retour d'expérience positif a contribué également dans cette diversification des domaines d'applications :

I.4.1 La distribution d'eau potable :

Après une première expérimentation dans les branchements, les hydrauliciens n'ont pas tard  à généraliser les tubes PEHD dans les réseaux de distribution d'eau potable et dans les réseaux d'adduction. La bonne tenue à la pression pendant toute leur durée d'exploitation (au minimum 50 ans) et la parfaite  tanch t  par rapport aux fuites (le taux de fuite le plus bas par rapport à tous les matériaux connus), ont convaincu les professionnels de l'AEP   généraliser leur utilisation en Algérie jusqu'au diamètre 630 mm.

La disponibilité d'une solution complète en PEHD (tubes – raccords – système de branchements) a également contribué à susciter l'intérêt des professionnels en charge de la gestion des réseaux d'AEP.



Figure I.3 : Tube d'eau potable (Marqué en bleu)

I.4.2 La distribution de gaz :

Paradoxalement, les gaziers ont été les premiers à adopter les tubes PEHD en tant que produit exclusif dans les réseaux de distribution de gaz à moyenne pression (4 - 8 et jusqu' à 10 bars dans certains pays).

L'étanchéité aux fuites et la bonne résistance aux fissurations lentes et rapides ont été les caractéristiques déterminantes dans ce choix.



Figure I.4 : Tube de gaz (Marqué en jaune)

I.4.3 L'assainissement sous pression :

La bonne résistance chimique des tubes en PEHD vis-à-vis de l'agressivité des effluents, ainsi que l'absence de risque de pollution et ce, grâce à la qualité des assemblages (par soudage) et une bonne flexibilité ont conduit tout naturellement à leur prescription dans les réseaux d'assainissement sous pression, notamment lorsque le tracé s'avère accident .

I.4.4 Le dessalement de l'eau de mer :

Depuis l'av nement des grands diamètres, permettant le passage de grands débits, l'amenée de l'eau de mer vers les stations de dessalement se fait exclusivement en tubes PEHD.

Ce quasi monopole dans une telle application a été obtenu grâce à deux avantages : Une insensibilité à la salinité de l'eau de mer et une flexibilité qui permet aux conduites de résister durablement aux courants marins sans se d t rier.



Figure I.5 : Tubes PEHD dans le dessalement de l'eau de mer

I.4.5 Les réseaux anti-incendie :

Les tubes PEHD s'utilisent de plus en plus dans ce type de réseau, car ils ne fuient pas et ne se d t rient pas dans le temps sous l'effet de la corrosion, et ce, grâce à leur inertie chimique.

Par ailleurs, pour les tronçons de réseau hors sol, il y a lieu d'utiliser des tubes en acier.

I.5 Méthode de fabrication (extrusion) [23]:

Le tube PEHD est fabriqué par extrusion au niveau des deux sites de production du GROUPE, à savoir Sidi Bel Abb  s et S  if.

L'extrusion consiste à faire passer la matière à travers une filiere afin d'obtenir des produits finis tels que des canalisations par un processus technologique continu. Une ligne d'extrusion présente différents éléments, tous indispensables pour fabriquer une canalisation de bonne qualité:

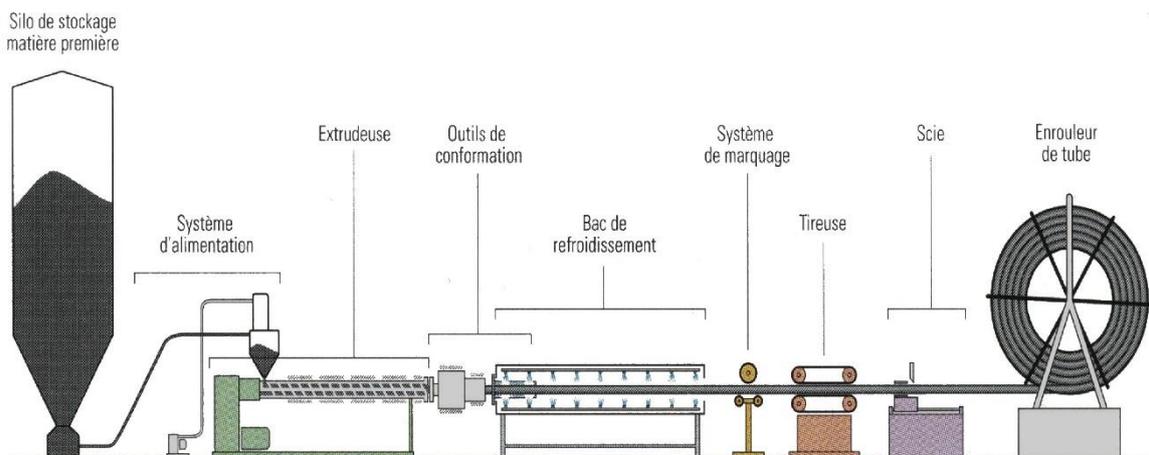


Figure I.6 : Fabrication du tube

I.6 les avantages du poly éthyl  ne :

- Le PE est monobloc et homog  ne.
- Grande flexibilité : encourage la pose sur de grandes longueurs et améliore les capacités hydrauliques.
- R  sistance à la fissuration.
- Peu sensible aux mouvements de terrain.
- Etanch été parfaite avec système de raccords électro soudables, mécaniques ou soudure bout à bout.
- R  sistance chimique et indifférence à la corrosion.
- R  sistance mécanique  lev  e.
- Facilité de mise en œuvre.
- Respecte l'environnement.
- Faible coefficient de rugosité, peu de perte de charge.

I.7 Raccordement des tubes en PE [24]:

Différentes méthodes de raccordement ont été élaborées depuis que les tubes en polyéthylène sont arrivés sur le marché au début des années 60.

De nos jours, il existe plusieurs méthodes de raccordement adaptées à toutes les dimensions de tubes en PE :

- ✓ Collet avec contre-bridges en acier
- ✓ Raccords mécaniques
- ✓ Raccords  lectrosoudage
- ✓ Soudage bout à bout

Un collet avec une contre-bride est principalement utilisé pour raccorder des sections de tubes plus longues, pour les raccordements aux vannes et regards ou à des tubes constitués d'autres matières.

Les raccords mécaniques pour toutes les tailles de tubes en PE sont maintenant disponibles dans diverses conceptions métalliques et plastiques.

Ils sont préférables dans les conditions suivantes :

- Contrainte de flexion extrême à court terme lors de l'immersion et de la pose
- Conditions de soudage difficiles ou impossibles
- Jonction sous l'eau pour la réparation de tubes en général

Les raccords électrosoudage sont maintenant disponibles en 500 mm et dans l'avenir des diamètres supérieurs seront disponibles.

Le soudage bout à bout peut être utilisé sur toutes les tailles de tubes en PE, mais il est principalement utilisé sur les tubes de 110 mm à 2000 mm de diamètre.

I.7.1 Electro-soudage :

I.7.1.1 Principe de la technique :

Cette technique consiste à réaliser des assemblages au moyen de raccords électro-soudables (manchons, coudes, t s...).

Un raccord en polyéthylène est dit électro-soudable lorsqu'il contient une résistance électrique, introduite lors du processus d'injection. Cette résistance est assortie de deux connecteurs électriques apparents sur la face extérieure du raccord. Ils permettent la liaison avec la machine de soudage.

Une fois reli é à une source d'énergie, cette r é s i s t a n c e lib è r e une chaleur suffisamment optimis é e pour provoquer la fusion en surface des mati è r e s poly é t h y l è n e , celle du raccord et des deux tubes à assembler (Dufour D et Meister E [1]).

Apr è s refroidissement, et donc fin du cycle, il y'aura constitution d'un assemblage coh é r e n t assurant une é t a n c h é t é quasi parfaite.

Cette technique est valable pour l'ensemble des diam è t r e s sans exclusion.



Figure I.7 : L'électrosoudage

I.7.1.2 Equipement :

Le soudage sera effectu é par une machine sp é c i a l e et d é d i é e à cette technique. Elle permet, apr è s pr é p a r a t i o n de l'assemblage et identification du raccord (par le biais d'un code à barres), le pilotage automatique de l'op é r a t i o n de soudage jusqu' à son terme.

Sur chantier, le recours à une source d'énergie auto n o m e , comme le groupe é l e c t r o g é n e , est n é c e s s a i r e . Il faut veiller à la fiabilit é de cet é q u i p e m e n t pour s'assurer de la qualit é de la tension g é n é r é e .



Figure I.8 : Equipement de l'électrosoudage

I.7.2 Soudage bout à bout :

I.7.2.1 Description g é n é r a l e :

Le soudage bout à bout est une technique d'assemblage des thermoplastiques par la fusion des extr é m i t é s d e d e u x é l é m e n t s t u b u l a i r e s a u m o y e n d ' u n e p l a q u e c h a u f f a n t e , a p p e l é e m i r o i r .

Ce proc é d é c o n s i s t e à f a i r e f o n d r e l a m a t i è r e a u n i v e a u d e l a s u r f a c e à s o u d e r , à m e t t r e e n c o n t a c t l e s p a r t i e s f o n d u e s p o u r e n a s s u r e r l e m é l a n g e i n t i m e e t à l a i s s e r r e f r o i d i r l ' a s s e m b l a g e a i n s i c o n s t i t u é . A l ' é t a t f o n d u , l e s c h a î n e s d e p o l y é t h y l è n e d e s d e u x t u b e s m i s e n c o n t a c t s ' i n t e r p é n è t r e n t e t , e n s e s o l i d i f i a n t , s e f i g e n t d a n s c e t é t a t , p r o c u r a n t a i n s i à l a s o u d u r e u n e c e r t a i n e s o l i d i t é



Figure I.9 : Plaque chauffante



Figure I.10: Machine à souder bout à bout

I.7.2.2 Machines à souder «bout à bout» :

Applications :

Les machines hydrauliques à souder “bout à bout” sont adaptées pour le PE, PP, PVDF et autres matériaux thermoplastiques pour tubes et raccords.

Leur cadre d'auto-alignement et leurs dimensions compactes en font des machines très adaptées pour les travaux de constructions de réseaux d'eau, de gaz, d'égouts et d'irrigation.

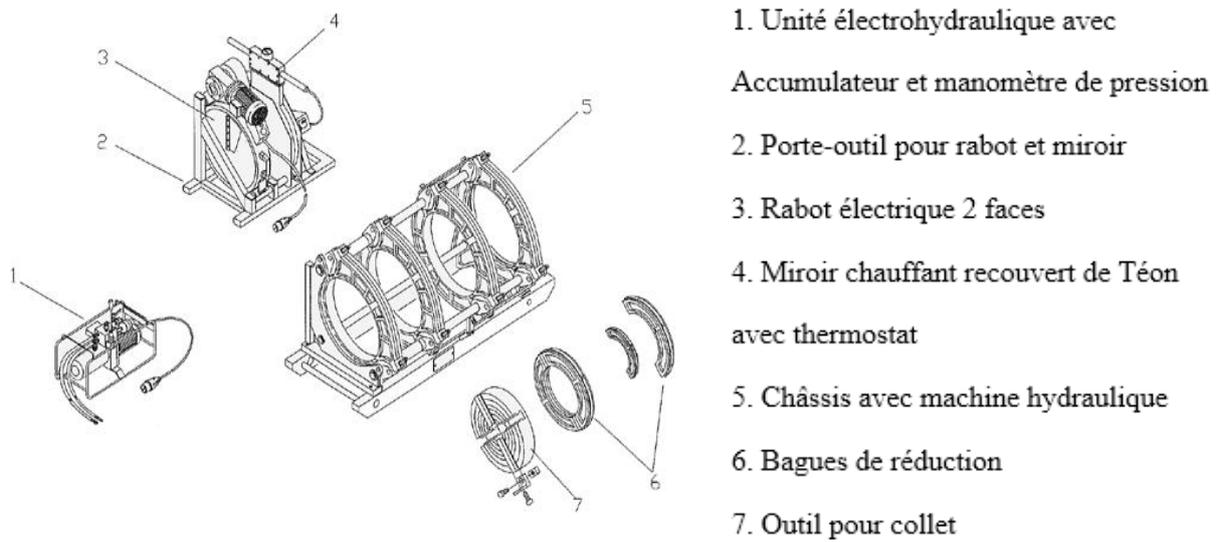


Figure I.11 : Equipements du soudage bout à bout

I.7.2.3 Les étapes principales du soudage bout à bout :

Le soudage bout à bout peut être divisé en quatre phases distinctes (figure I.12), bien représentées sur un diagramme temps– pression – température (figure I.13), qui se retrouvent dans la plupart des études du procédé (Stokes [2] et Wolters et Venema [3]).

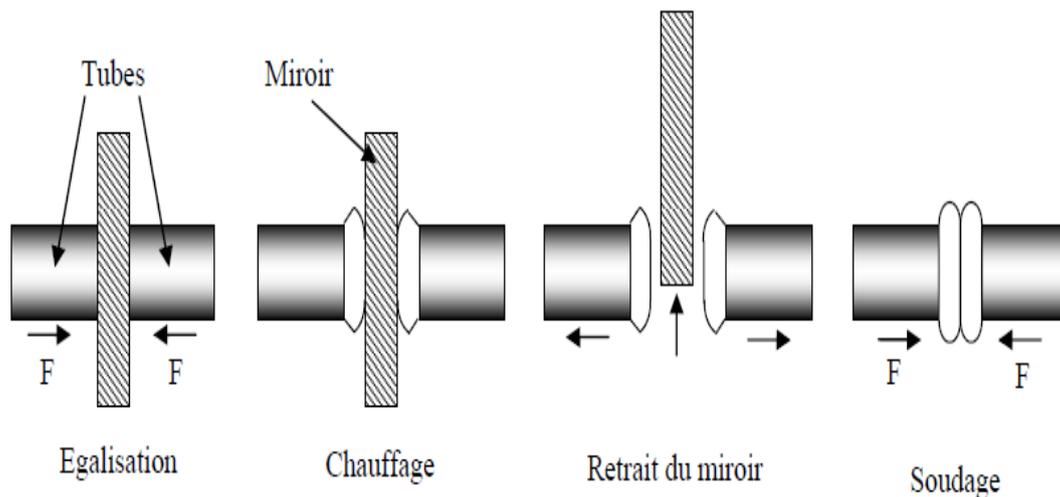


Figure I.12 : Les 4 phases de soudage

Phase 1 : Egalisation

Cette étape a pour objectif de s’assurer que la totalité de la surface du tube est en contact avec le miroir chauffant. Les deux pièces à souder sont plaquées contre le miroir avec une certaine pression (0,18 MPa). Cette étape dure quelques secondes, le temps qu’une fine couche de polymère ait le temps de fondre. C’est ici que le cordon de soudure commence à se former.

Phase 2 : Chauffage

Les deux tubes sont laissés en contact avec le miroir mais la pression appliquée est très faible, de l'ordre de 0,01 MPa, afin de s'assurer que les tubes restent en contact avec le miroir. Cette étape a pour but l'élargissement de la couche de polymère fondu, nécessaire au soudage. Le chauffage se termine lorsque l'on considère que l'épaisseur de polymère fondu obtenue est suffisante pour former une soudure de bonne qualité

Phase 3 : Retrait du miroir

Les tubes sont écartés du miroir afin de pouvoir le retirer. Sa durée doit être la plus courte possible pour limiter l'écoulement et le refroidissement du polymère fondu en contact avec l'air ambiant.

Phase 4 : Soudage

C'est la dernière étape durant laquelle les deux tubes sont plaqués l'un contre l'autre avec une certaine pression que l'on maintient jusqu'à ce que la soudure se solidifie. Durant cette étape, la matière s'écoule latéralement donnant la forme définitive du bourrelet.

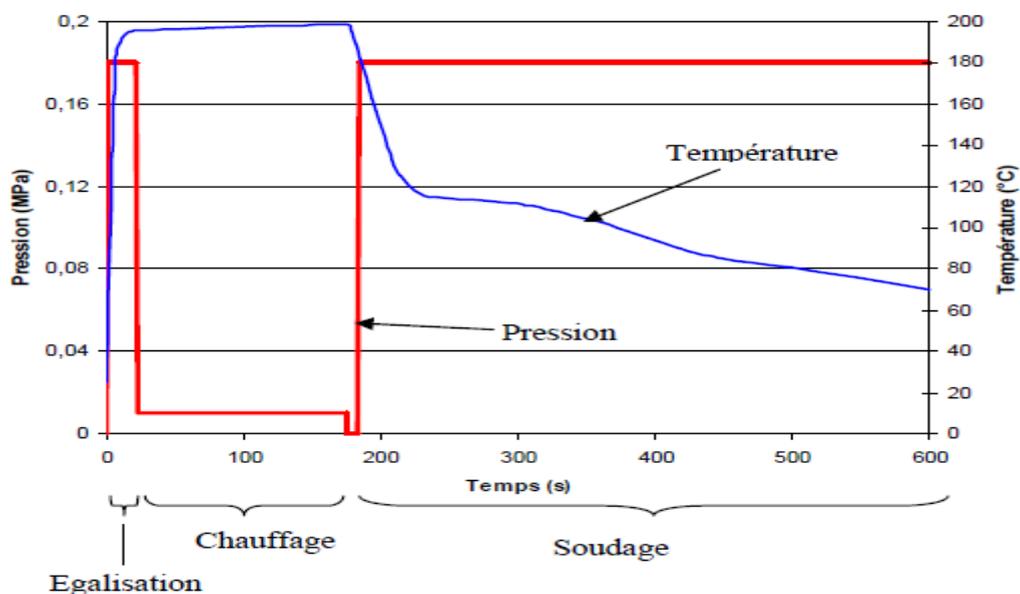


Figure I.13 : Diagramme temps – pression – température

1.7.2.4 Les bourrelets de soudure :

Les soudures sont caractérisées par l'apparition d'un bourrelet, ou cordon de soudure, au niveau du plan de soudage qui résulte de l'éjection latérale de la matière fondue formée à l'extrémité des tubes. Sa forme est utilisée généralement pour donner une première indication visuelle de la qualité de la soudure.

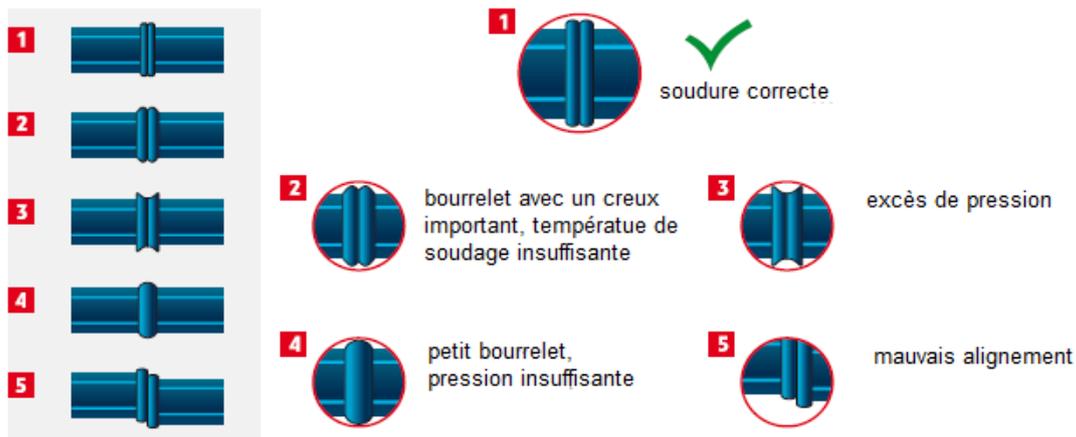


Figure 1.14 : Bourrelet de soudage

I.7.2.5 Avantages de soudage bout à bout :

- Pas d'achat de composants ou de faibles couts
- Utilisable sur les très gros diam ètres (180 et au-del à) pour des co ûts très inf érieurs aux raccords électrosoudage.

I.7.3 Contrainte par rapport à l'électrosoudage :

- ✓ Pas de sécurisation (point fort des assemblages).
- ✓ Bourrelets résiduels int érieur et ext érieur.
- ✓ Difficile à utiliser avec les tubes conditionnés couronnes et en tourets.
- ✓ Nécessite d'une mobilité longitudinale des tubes (réparations impossible remblaiements à l'avance impossible).
- ✓ Outillage lourds, encombrant, souvent peut adapter aux conditions de chantier.
- ✓ Incompatibilité avec les intemp éries puisque la zone de soudage est à nu pendant un certain temps.

Notre étude thermique est appliqu ée au proc é d é de soudage bout à bout. Les paramètres de soudage qui sont mentionnés ci-dessous seront utilisés comme valeurs de base pour la plupart des essais et sont appelés "Param ètres standards" ou "param ètres moyens". Pour un tube de 160 mm de diam ètre avec un rapport diam ètre sur épaisseur égal à 11 :

- La température du miroir est de 220 °C,
- Les pressions d'égalisation et de soudage sont identiques et égales à 0,18 MPa,
- La pression de chauffage doit rester inf érieure à 0,01 MPa,
- La durée de l'égalisation est d'environ 22s,
- La durée de la phase de chauffage est de 175s,
- La durée de la phase de soudage est de 17,5 min.

Chapitre



II

Analyse Numérique du Transfert Thermique

II.1. Généralités sur les transferts de chaleur :

II.1.1 Introduction :

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, on présentera ensuite le mécanisme d'apparition de chacun de ces modes au sein de l'opération de soudage bout à bout du tube en polyéthylène à haute densité dont on vise sur la détermination de la distribution des températures pendant cette opération.

II.1.2 Définitions [25] :

II.1.2.1 Champ de température :

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- ✓ Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- ✓ Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou instationnaire.

II.1.2.2 Gradient de température :

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

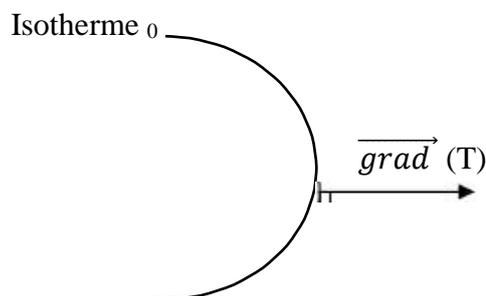


Figure II.1 : Isotherme et gradient thermique

$$\overrightarrow{\text{grad}} (T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{II.1})$$

Avec : \vec{n} : vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

II.1.2.3 Flux de chaleur :

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\Phi = \left(\frac{1}{S}\right) \left(\frac{dQ}{dt}\right) \quad (W m^{-2}) \quad (\text{II.2})$$

Où S est l'aire de la surface (m^2).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (W) \quad (\text{II.3})$$

II.1.3 Formulation d'un problème de transfert de chaleur :

II.1.3.1 Bilan d'énergie :

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être [4] :

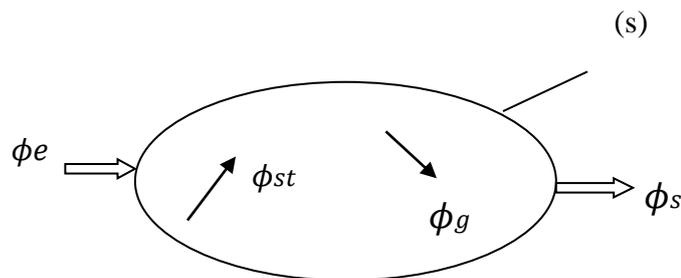


Figure II.2 : Bilan d'énergie

Φ_{ST} : flux de chaleur stocké Φ_G : flux de chaleur généré Φ_E : flux de chaleur entrant Φ_S : flux de chaleur sortant	}	dans le système (S)
---	---	---------------------

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\phi_e + \phi_g = \phi_s + \phi_{st} \quad (w) \quad (II.4)$$

II.1.3.2 Expression des flux d'énergie :

Il faut maintenant établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, nous obtiendrons l'équation différentielle dont la résolution permettra de connaître l'évolution de la température en chaque point du système [27].

II.1.3.2.1 Conduction :

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres [5].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{grad} (T) \quad (II.5)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (w) \quad (II.6)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Conductivité thermique du milieu ($W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

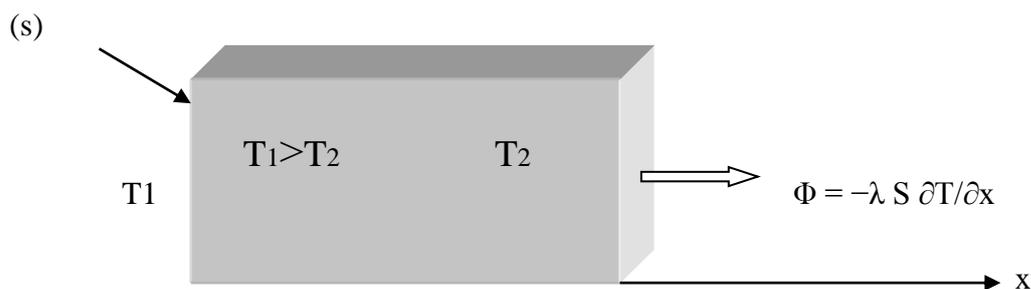


Figure II. 3 : Représentation schématique du phénomène de conduction

II.1.3.2.2 Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide [6].

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de NEWTON :

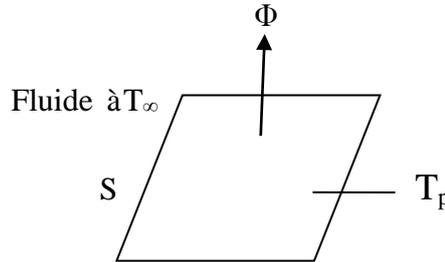


Figure II.4 : Transfert thermique par convection

$$\phi = h S (T_p - T_\infty) \dots(W) \quad (II.7)$$

Avec:

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W m⁻² °C⁻¹)

T_p : Température de surface du solide (°C)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m²)

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

II.1.3.2.3 Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation [7] :

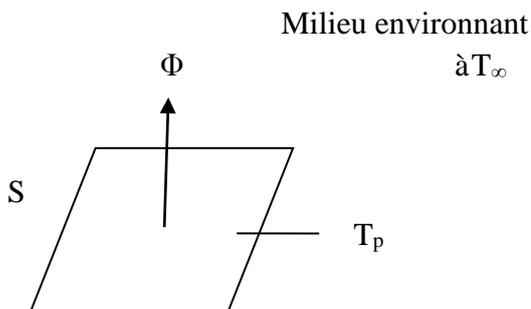


Figure II.5 : Transfert thermique par rayonnement

$$\Phi = \sigma \epsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad \dots \quad (W) \quad (II.8)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : Constante de Stephan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface (K)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)

S : Aire de la surface (m^2)

II.1.4 Equation de la Chaleur :

II.1.4.1 Equation de la chaleur en coordonnées cartésiennes [8] :

Coordonnées cartésiennes (3.D) :

Dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (II.9)$$

Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas :

a) Si le milieu est isotrope : $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$

b) S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système : $\dot{q} = 0$

c) Si le milieu est homogène, λ n'est fonction que de T.

Les hypothèses a) + b) + c) permettent d'écrire :

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{d\lambda}{dt} \left[\left(\frac{dT}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dT}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dT}{dz} \right)^2 \right] = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II.10)$$

d) Si de plus λ est constant (écart modéré de température), nous obtenons l'équation de Poisson :

$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II.11)$$

Le rapport $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ est appelé la diffusivité thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) qui caractérise la vitesse de propagation d'un flux de chaleur à travers un matériau.

e) En régime permanent, nous obtenons l'équation de Laplace

$$\nabla^2 T = 0 \quad (\text{II.12})$$

II.1.4.2 Equation de la chaleur en coordonnées cylindriques :

Coordonnées cylindriques (3.D) : s'écrit sous la forme :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.13})$$

Coordonnées cylindriques (2.D) :

Dans le cas d'un problème à symétrie cylindrique où la température ne dépend que de r et de z, l'équation (II.13) peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.14})$$

$$\frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (\text{Sans source de chaleur})$$

Donc l'équation devient :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.15})$$

II.1.4.3 Equation de la chaleur en coordonnées sphériques :

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rT)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} \quad (\text{II.16})$$

II.2 Méthode des différences finies

II.2.1 Introduction :

Pour passer d'un problème exact continu régi par des équations aux dérivées partielles (EDP) au problème approché discret, il existe trois grandes familles de méthodes :

- ✓ Les différences finies ;
- ✓ Les volumes finis ;
- ✓ Les éléments finis.

Compte tenu de la complexité du problème (T dépend de t), on ne sait pas le résoudre analytiquement et le domaine de calcul est très difficile nous pouvons donc choisir la méthode des **Différences Finies [9]**.

La méthode des Différences Finies est une méthode de résolution des Equations aux Dérivées Partielles (EDP) très puissante. Elle est caractérisée par :

- ✓ Sa facilité à discrétiser les EDP et les Conditions aux Limites (CL),
- ✓ Sa difficulté à discrétiser les domaines complexes sous forme de grille,
- ✓ Sa rapidité en temps de calcul.

II.2.2 Les équations aux dérivées partielles (EDP) :

Dans cette partie un classement des équations aux dérivées partielles.

Classification :

Considérons la forme générale d'une Equation aux Dérivées Partielles (EDP) de second ordre suivant les deux variables indépendantes (x et y) :

$$A \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + D \frac{\partial \phi}{\partial x} + E \frac{\partial \phi}{\partial y} + F\phi + G = 0 \quad (\text{II.17})$$

Une classification assez simple de cette équation peut être faite sur la base des coefficients associés aux dérivées d'ordre le plus élevé A , B et C . On calcule le déterminant défini par :

$$\Delta = B^2 - 4AC$$

L'équation est dite de type

- Elliptique si $\Delta < 0$,
- Parabolique si $\Delta = 0$,
- Hyperbolique si $\Delta > 0$.

Dans le cas d'un système d'EDP, il faut écrire l'équation caractéristique du système pour trouver sa nature. La marche à suivre est illustrée par l'exemple suivant :

$$A_1 \frac{\partial U}{\partial x} + B_1 \frac{\partial U}{\partial y} + C_1 \frac{\partial V}{\partial x} + D_1 \frac{\partial V}{\partial y} = E_1 \quad (\text{II.18})$$

$$A_2 \frac{\partial U}{\partial x} + B_2 \frac{\partial U}{\partial y} + C_2 \frac{\partial V}{\partial x} + D_2 \frac{\partial V}{\partial y} = E_2 \quad (\text{II.19})$$

On écrit les déplacements :

$$dU = \frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial y} dy \quad (\text{II.20})$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy \quad (\text{II.21})$$

Les équations précédentes s'écrivent sous la forme compacte suivante :

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ dx & dy & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dy & dy \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ dU \\ dV \end{bmatrix}$$

Le déterminant :

$$(A_1 C_2 - A_2 C_1) dy^2 - (A_1 D_2 - A_2 D_1 + B_1 C_2 - B_2 C_1) dx dy + (B_1 D_2 - B_2 D_1) dx^2 = 0 \quad (\text{II.22})$$

On divise l'équation précédente par dx^2 , et on définit $f' = \frac{dy}{dx}$

$$af'^2 - bf' + c = 0 \quad (\text{II.23})$$

$$\Delta = b^2 - 4ac \quad (\text{II.24})$$

L'équation est dite de type **elliptique** si $\Delta < 0$, elle est **parabolique** si $\Delta = 0$, et **hyperbolique** si $\Delta > 0$

Une des utilités de cette classification est de prévoir le comportement de l'équation vis-à-vis des conditions aux limites. Si nous imaginons un écoulement de fluide de gauche vers la droite, une perturbation en un point donné n'a pas d'influence amont si l'équation est de type parabolique. Si par contre l'équation est de type elliptique une perturbation quelconque en un point quelconque aura une influence dans toutes les directions de l'espace. Une conséquence directe de cette caractéristique est qu'un problème de type parabolique peut être résolu par une marche avant, alors qu'une équation de type elliptique nécessite la prise en considération des conditions aux limites imposées sur toutes les frontières du domaine de calcul [10], [11].

Exemple :

L'équation de Laplace $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$ elliptique.

L'équation de diffusion $\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0$ parabolique.

L'équation $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$ hyperbolique.

II.2.3 Principe de la méthode des différences finies :

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage. Elle repose sur deux notions : la discrétisation et la convergence du schéma numérique ainsi obtenu [12], [28].

II.2.3.1 Les schémas numériques :

II.2.3.1.1 Schéma explicite :

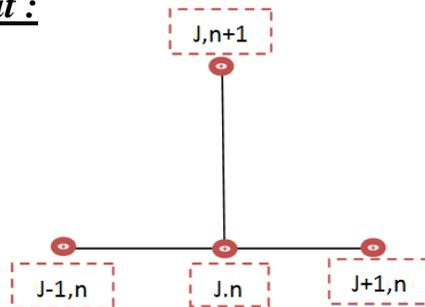


Figure II.6 : Schéma explicite

L'équation précédente sera approximer par le schéma suivant :

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + \partial(\Delta t) = a \frac{U_{i-1}^n - 2U_i^n + U_{i+1}^n}{\Delta x^2} + \partial\Delta x^2 \quad (\text{II.25})$$

On remarque qu'on a utilisé un schéma avant d'ordre un pour la dérivée par rapport au temps et un schéma centré d'ordre deux pour la dérivée par rapport à l'espace.

Lors de cette discrétisation nous avons choisi de prendre les termes de droites au temps n.

ce schéma s'appelle un schéma explicite, puisqu'il permet de formuler l'expression de la variable au point i et à l'instant n+1 explicitement en fonction de la solution déjà calculée au temps n. Ce schéma est représenté par la molécule suivante.

L'équation $\frac{\theta_{i-1} - 2\theta_i + \theta_{i+1}}{\Delta x^2} = 0$ sera arrangé comme suit :

$$U_i^{n+1} = \lambda U_{i-1}^n + (1 - 2\lambda)U_i^n + \lambda U_{i+1}^n \quad (\text{II.26})$$

Avec

$$\lambda = a \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

Cette équation sera appliqué aux nœuds d'une même rangé (c.a.d. n = cste).

• Concept de stabilité d'un schéma :

Un schéma est dit stable s'il amorti les erreurs provenant des C.I., des C.L. Et de l'approximation utilisée. S'il amplifie les erreurs, le schéma sera instable et ne pourra pas converger vers une solution réaliste.

Pour introduire le concept de stabilité nous allons utiliser le schéma de l'équation :

$$U_i^{n+1} = \lambda U_{i-1}^n + (1 - 2\lambda)U_i^n + \lambda U_{i+1}^n \quad (\text{II.27})$$

Soit u^n la solution exacte (en minuscule) et U^n la solution numérique à l'instant n. ces deux quantités seront liées par :

$$U_i^n = u_i^n + \delta u_i^n$$

Où δu_i^n est l'erreur introduite dans le calcul par l'approximation du schéma (erreur de troncature).

Remplaçons cette équation dans la première équation, nous obtenons :

$$\frac{\delta u_i^{n+1} - \delta u_i^n}{\Delta t} - \frac{\delta u_{i+1}^n - 2\delta u_i^n + \delta u_{i-1}^n}{\Delta x^2} = \partial(\Delta t, \Delta x^2) \quad (\text{II.28})$$

Ou

$$\delta u_i^{n+1} = \lambda \delta u_{i-1}^n + (1 - 2\lambda)\delta u_i^n + \lambda \delta u_{i+1}^n + \Delta t \partial(\Delta t, \Delta x^2) \quad (\text{II.29})$$

Cette dernière équation décrit l'évolution de l'erreur en fonction du temps. Comme il est dit précédemment, un schéma numérique stable ne doit pas amplifier les erreurs. Cette conditions est bien vérifiée si $(1-2\lambda) > 0$, puisque $\lambda = \Delta t / \Delta x^2$ est toujours positif.

$$|\delta u_i^{n+1}| \leq (1 - 2\lambda)|\delta u_i^n| + \lambda|\delta u_{i-1}^n| + \lambda|\delta u_{i+1}^n| + \Delta t \partial(\Delta t, \Delta x^2)$$

$$(\delta u_i^{n+1})_{max} \leq (\delta u_i^n)_{max} + \Delta t \partial(\Delta t, \Delta x^2)$$

En d'autres termes l'erreur introduite par un pas de temps Δt ne peut être supérieur à $\Delta t \partial(\Delta t + \Delta x^2)$, [13].

II.2.3.1.2 Schéma implicite :

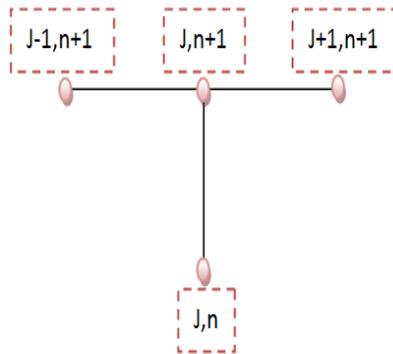


Figure II.7 : Schéma implicite

Reprenons le problème de la conduction thermique non stationnaire et réécrivons l'équation discrète comme suit (les termes de droite sont au temps n+1)

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + \partial(\Delta t) = a \frac{U_{i-1}^{n+1} - 2U_i^{n+1} + U_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \partial(\Delta x^2) \quad (II.30)$$

Après groupement et arrangement :

$$\lambda U_{i-1}^{n+1} - (1 - 2\lambda)U_i^{n+1} + \lambda U_{i+1}^{n+1} = U_i^n \quad (II.31)$$

Cette équation présente trois inconnus en même temps, ce qui ne permet pas de la résoudre directement comme c'était le cas pour le schéma explicite. Cette forme de discrétisation est appelée schéma implicite. Pour trouver la solution il faut écrire l'ensemble des équations issues de l'application de la dernière équation sur tous les nœuds de la même ligne et ensuite résoudre le système tout entier [14].

II.2.3.1.3 Schéma de Crank-Nickolson :

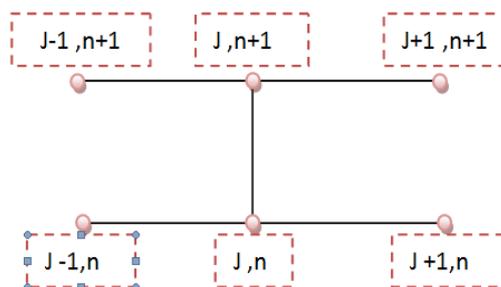


Figure II.8 : Schéma de Crank-Nickolson

Suivant ce schéma l'équation $\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$ s'écrira de la manière suivante :

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} \equiv a \left(\frac{1}{2} \frac{U_{i-1}^{n+1} - 2U_i^{n+1} + U_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{2} \frac{U_{i-1}^n - 2U_i^n + U_{i+1}^n}{\Delta x^2} \right) \quad (II.32)$$

Un tel schéma prend une moitié en explicite et l'autre moitié en implicite. Une façon plus généralisée de discrétiser l'équation $\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$ est :

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} \equiv a \left(\alpha \frac{U_{i-1}^{n+1} - 2U_i^{n+1} + U_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + (\alpha - 1) \frac{U_{i-1}^n - 2U_i^n + U_{i+1}^n}{\Delta x^2} \right) \quad (II.33)$$

Pour $\alpha=0$ le schéma est explicite, pour $\alpha=1$ il est implicite et pour $\alpha=.05$ il devient Crank-Nicholson [15], [16].

II.2.3.1.4 Schéma de la Direction alternée implicite (ADI) :

Lorsque l'équation différentielle partielle $\nabla^2 u = 0$ est résolue par la méthode des différences finies, la matrice de coefficients résultant est libre. La faible densité augmente à mesure que le nombre de nœuds augmente. S'il y a 21 nœuds, 81% des coefficients sont des zéros ; s'il y a 105 nœuds, 96% sont des zéros.

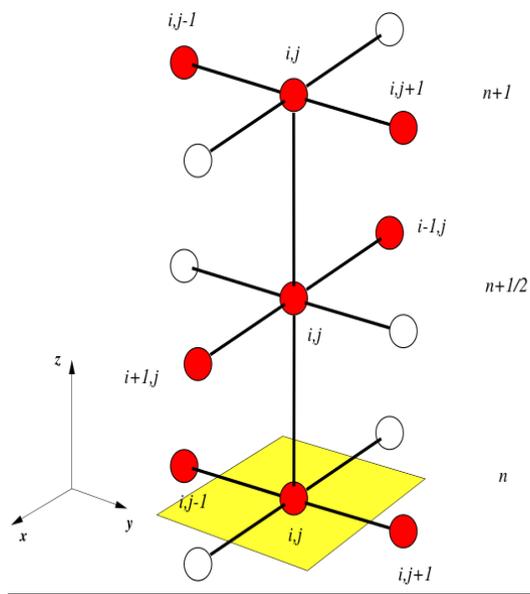


Figure II.9 : Schéma ADI

Le système d'équations pour le cas unidimensionnel a toujours un coefficient de matrice tridiagonale pour lequel l'algorithme Thomas efficace peut être utilisé. Procédé ADI peut être appliqué pour le système à deux ou trois dimensions pour obtenir une matrice de coefficients tridiagonale.

$$\nabla^2 u = 0$$

Utilisation de différence finie, la valeur au niveau du nœud (i, j) pour l'itération (m + 1) est donnée à titre

$$u_{i,j}^{(m+1)} = \frac{1}{4} [u_{i,j+1}^{(m)} + u_{i,j-1}^{(m)} + u_{i+1,j}^{(m)} + u_{i-1,j}^{(m)}] \quad (\text{II.34})$$

Nous ajoutons maintenant et soustrayons de cette équation pour obtenir

$$u_{i,j}^{(m+1)} = u_{i,j}^{(m)} + \frac{1}{4} [u_{i,j+1}^{(m)} + u_{i,j-1}^{(m)} + u_{i+1,j}^{(m)} + u_{i-1,j}^{(m)} - 4u_{i,j}^{(m)}] \quad (\text{II.35})$$

Ou de façon équivalente

$$u_{i,j}^{(m+1)} - u_{i,j}^{(m)} = \frac{1}{4} \{ [u_{i,j+1}^{(m)} - 2u_{i,j}^{(m)} + u_{i,j-1}^{(m)}] + [u_{i+1,j}^{(m)} - 2u_{i,j}^{(m)} + u_{i-1,j}^{(m)}] \} \quad (\text{II.36})$$

Chaque itération est considéré comme une procédure en deux étapes dans lequel la première étape fait avancer à la (m +) et le niveau de la seconde étape (m + 1) niveaux.

Première étape :

$$u_{i,j}^{(m+1/2)} - u_{i,j}^{(m)} = \frac{1}{4} \{ [u_{i,j+1}^{(m+1/2)} - 2u_{i,j}^{(m+1/2)} + u_{i,j-1}^{(m+1/2)}] + [u_{i+1,j}^{(m)} - 2u_{i,j}^{(m)} + u_{i-1,j}^{(m)}] \} \quad (\text{II.37})$$

Deuxième étape :

$$u_{i,j}^{(m+1)} - u_{i,j}^{(m+1/2)} = \frac{1}{4} \{ [u_{i,j+1}^{(m+1/2)} - 2u_{i,j}^{(m+1/2)} + u_{i,j-1}^{(m+1/2)}] + [u_{i+1,j}^{(m+1)} - 2u_{i,j}^{(m+1)} + u_{i-1,j}^{(m+1)}] \} \quad (\text{II.38})$$

La méthode ADI produit un ensemble d'équations tridiagonale à la (m + 1/2) niveau. Les équations peuvent être résolues long de toutes les lignes de la grille, une ligne à la fois. Une fois, tous les nœuds ont été élevés à la (m + 1/2) niveau, une procédure similaire pour la colonne de nœuds est appliquée. Une itération en deux étapes est achevée lorsque les nouvelles valeurs sont calculés [17].

Conclusion :

Après avoir maîtrisé les phénomènes du transfert thermiques et les méthodes numériques qui permis de résoudre les équations aux dérivées partielles (l'équation de chaleur), le prochain chapitre sera consacré sur la réalisation d'une approche de modélisation numérique par le biais de la méthode des différences finis schéma (ADI) sous la programmation Matlab.

Chapitre

III

*Modélisation et Simulation
thermique du Soudage Bout à
Bout*

III.1 Introduction :

L'intérêt de la simulation numérique pour le soudage bout à bout est multiple. Elle permet, en effet, de pouvoir s'assurer que la physique du procédé a bien été comprise, puis d'améliorer la compréhension du soudage en comparant les différents résultats obtenue par la simulation.

La simulation des transferts thermiques lors du soudage bout à bout a été réalisée numériquement par la méthode des différences finies, schéma implicite de direction alterné sous l'environnement Matlab.

III.2 Bibliographie concernant la modélisation du soudage Bout à Bout :

Les réseaux de canalisations enterrés et construits en polyéthylène 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 2 bouts de tubes en usant de la chaleur pour faire fondre le HDPE 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 leur environnement, pour cela plusieurs chercheurs ont étudiés le procédé de soudage bout à bout dans les tubes en polyéthylène de haute et moyenne densité. De nombreux procédés ont été développés, ils diffèrent par la manière dont la chaleur est appliquée et à l'équipement utilisé.

Il ressort de la littérature que la modélisation du procédé de soudage bout à bout a été réalisée par : Wolters et al [3] lesquels sont concernés par les mécanismes actifs pendant la phase d'égalisation. Les étapes du procédé de Pimputkar [18] se limite à la phase de chauffage (sans pression imposée) et à la phase de soudage (plaquage des tubes l'un sur l'autre avec une pression), son modèle permet de prédire la température et le déplacement de matière au cours du temps lors du procédé.

Shillitoe et al [19] ont simulé uniquement les trois premières secondes de la phase d'égalisation, le calcul est fait sur un maillage comprenant seulement 2 mm du tube à partir du miroir chauffant. Cette simulation est restreinte au niveau du contact avec le miroir et en surface du tube.

Parmi les quatre phases du soudage bout à bout, Benkreira et al [20] ont étudié 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.

La plupart des auteurs se limitent uniquement à l'analyse de la première phase, en s'intéressant aux premières secondes de la phase, ou à l'étude de chaque phase indépendante. Dans ce cas seulement le mode de conduction a été traité.

La combinaison des modes de transfert thermique conduction-convection-rayonnement, ne sera pas tenue en compte, hypothèse négligeant le cas réel.

Dans le présent chapitre nous traiterons l'aspect thermique dans les deux phases, égalisation et chauffage, on les considère comme une seule phase et ce en combinant les deux modes de transfert thermique conduction-convection, situation qui se rapproche plus du cas réel.

III.3 Description du procédé :

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 par la plaque chauffante, l'opération de chauffage se fait par les deux modes de transfert thermique conduction et convection. Le mode de transfert de la chaleur entre les parois cylindriques du tube et la surface du miroir est la conduction. Les surfaces intérieure et extérieure du tube sont en contact avec l'air ambiant, ce qui correspond au mode de transfert par convection.

III.4 Géométrie et domaine d'étude :

S'agissant d'une géométrie 2D axisymétrique, celle-ci est dessinée sur un plan de coupe passant par l'axe de symétrie de la géométrie qui correspond à l'axe du tube. Ainsi, le tube est représenté par un rectangle dont la largeur est l'épaisseur de la paroi du tube et dont la longueur correspond à la partie du tube étudié.

Le miroir est représenté dans ce même plan par une droite perpendiculaire à l'axe de symétrie. La figure 3.1 représente ce plan de coupe vu en perspective.

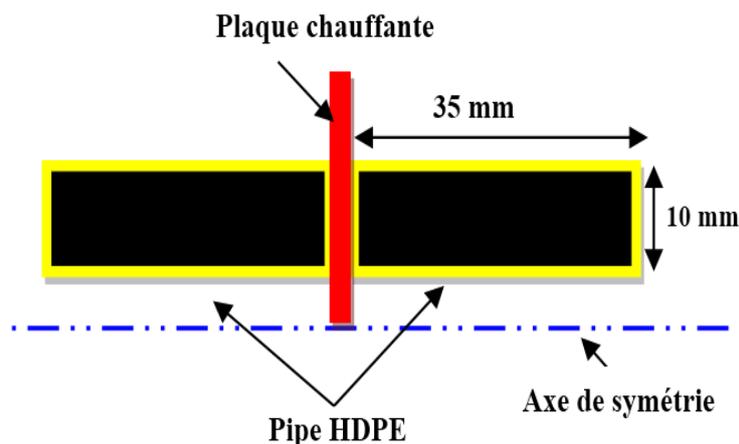


Fig. 3.1 : Géométrie utilisée pour la simulation (vue en perspective d'une partie du tube)

La géométrie complète du tube s'obtient par révolution autour de l'axe de symétrie (figure 3.2). La géométrie étudiée est un tube de 160 mm de diamètre et de 10 mm d'épaisseur. La longueur du tube est de 35 mm ce qui correspond à la région la plus proche au plan de soudage.

On estime que le tube est fixe par rapport au mors et que tous les phénomènes thermiques induits par le soudage sont localisés dans cette partie du tube. Le miroir, dans sa forme 3D, est un disque de diamètre 180 mm. Cette dimension ne correspond pas à son diamètre réel (350 mm). Ce qui est important, c'est que le miroir soit assez large pour que la totalité de la section du tube puisse être en contact avec lui à tout instant du procédé de soudage.

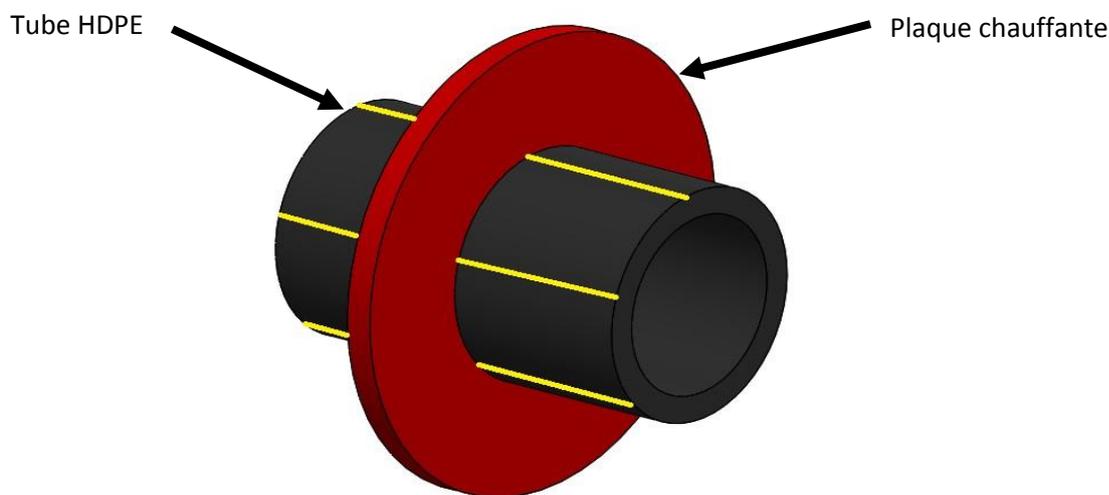


Fig. 3.2 : Géométrie utilisée pour la simulation (vue en 3D)

III.5 Hypothèses :

- ✓ Régime instationnaire ;
- ✓ Coordonné cylindrique ;
- ✓ Coefficient de conduction uniforme ;
- ✓ Coefficient de convection uniforme ;

III.6 Propriétés du matériau : polyéthylène à haute densité (HDPE)

Paramètre	valeur
Chaleur Spécifique (c) [J/kg.K]	2600
Conductivité thermique (λ) [w.m.K]	0.33
Masse volumique (ρ) [kg/m ³]	997
Coefficient de convection (h)	15

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques de polyéthylène (HDPE) à température ambiante

III.7 Modélisation mathématique :

III.7.1 Modèle thermique :

La détermination de la variation de la température en fonction du temps dans les deux dimensions axiales et radiales (r et z) est régit par l'équation de chaleur en coordonnées cylindrique (1).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (t > 0, r_i < r < r_e, z > 0) \quad (\text{III.1})$$

Où :

T : Température du tube,

r : Rayon du tube,

z : Longueur du tube,

a : La diffusivité thermique,

ρ : Masse volumique ;

c : Chaleur spécifique,

λ : Conductivité thermique du tube.

III.7.2 Les Conditions aux limites :

a) Phase initiale :

Le champ de température initiale $T(r,z)$ dans le tube sera pris égal à la température ambiante.

$$T(r,z,t) = T_0 \quad \text{à} \quad t = 0 \quad (\text{III.2})$$

b) phase d'égalisation et de chauffage :

$$r_i < r < r_e \quad T(r,z,t) = T_p \quad \text{à} \quad 0 < t < t_{eg} \quad (\text{III.3})$$

On considère dans cette étude que le contact entre la plaque chauffante et le tube est parfait se qui est décrit par l'équation (III.3).

Le flux convectif est introduit comme condition à la limite aux rayons intérieur et extérieur :

$$r = r_i, z \geq 0 \quad : \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{h}{\lambda} (T - T_a) \quad \text{à} \quad 0 < t < t_{ch} \quad (\text{III.4})$$

$$r = r_e, z \geq 0 \quad : \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{h}{\lambda} (T_a - T) \quad \text{à} \quad 0 < t < t_{ch} \quad (\text{III.5})$$

Le coefficient de convection est considéré uniforme sur toute la surface du tube.

III.8 Discrétisation par la méthode des Différences Finies :

Dans la discrétisation nous utiliserons deux schémas :

- Schéma cranck & nicolson
- Schéma ADI

III.8.1 Schéma de Cranck & Nicolson [21]:

III.8.1.1 Discrétisation de l'équation :

L'équation (III.1) devient :

Les coordonnées (r, z, t) sont représentées par : t = k ; r = r_i+i.Δr; z = j.Δz.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{(i,j)}^{k+1} - T_{(i,j)}^k}{\Delta t} ; \tag{III.6}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{i\Delta r} \left(\Theta \cdot \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1} - T_{(i-1,j)}^{k+1}}{2(\Delta r)} + (1 - \Theta) \cdot \frac{T_{(i+1,j)}^k - T_{(i-1,j)}^k}{2(\Delta r)} \right) ; \tag{III.7}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \Theta \cdot \frac{T_{(i-1,j)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i+1,j)}^{k+1}}{(\Delta r)^2} + (1 - \Theta) \cdot \frac{T_{(i-1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i+1,j)}^k}{(\Delta r)^2} ; \tag{III.8}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \Theta \cdot \frac{T_{(i,j-1)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i,j+1)}^{k+1}}{(\Delta z)^2} + (1 - \Theta) \cdot \frac{T_{(i,j-1)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i,j+1)}^k}{(\Delta z)^2} . \tag{III.9}$$

Les nœuds concernés par ce schéma sont indiqués ci-dessous :

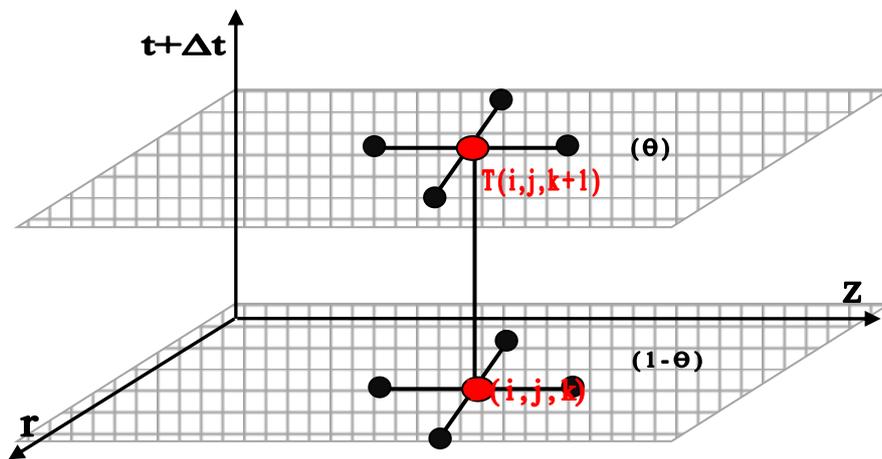


Fig. 3.3 : Schéma numérique de Cranck & Nicolson

Donc l'équation discrétisée devient :

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

$$\begin{aligned}
 &+(1 - \theta) \cdot \frac{T_{(i-1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i+1,j)}^k}{(\Delta r)^2} + \theta \cdot \frac{T_{(i,j-1)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i,j+1)}^{k+1}}{(\Delta z)^2} \\
 &+(1 - \theta) \cdot \frac{T_{(i,j-1)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i,j+1)}^k}{(\Delta z)^2} \quad \Bigg] \quad (III.10)
 \end{aligned}$$

En regroupant les différents termes de cette équation :

$$\begin{aligned}
 T_{(i,j)}^{k+1} - T_{(i,j)}^k = &\frac{a\Delta t}{(\Delta r)^2} \left(\theta \cdot \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1} - T_{(i-1,j)}^{k+1}}{2i} + (1 - \theta) \cdot \frac{T_{(i+1,j)}^k - T_{(i-1,j)}^k}{2i} + (\theta \cdot (T_{(i-1,j)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + \right. \\
 &T_{(i+1,j)}^{k+1})) + (1 - \theta) \cdot (T_{(i-1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i+1,j)}^k) \Bigg) + \frac{a\Delta t}{(\Delta z)^2} \left[\theta \cdot (T_{(i,j-1)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i,j+1)}^{k+1}) + \right. \\
 &\left. (1 - \theta) \cdot (T_{(i,j-1)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i,j+1)}^k) \right] \quad (III.11)
 \end{aligned}$$

En posant $C_r = \frac{a\Delta t}{(\Delta r)^2}$ et $C_z = \frac{a\Delta t}{(\Delta z)^2}$ avec $0 \leq \theta \leq 1$

$$\begin{aligned}
 T_{(i,j)}^{k+1} - T_{(i,j)}^k = &C_r \left[\theta \cdot \left(\frac{T_{(i+1,j)}^{k+1} - T_{(i-1,j)}^{k+1}}{2i} \right) + (1 - \theta) \cdot \left(\frac{T_{(i+1,j)}^k - T_{(i-1,j)}^k}{2i} \right) + (\theta \cdot (T_{(i-1,j)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + \right. \\
 &T_{(i+1,j)}^{k+1})) + (1 - \theta) \cdot (T_{(i-1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i+1,j)}^k) \Bigg] + C_z \left[\theta \cdot (T_{(i,j-1)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i,j+1)}^{k+1}) + \right. \\
 &\left. (1 - \theta) \cdot (T_{(i,j-1)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i,j+1)}^k) \right] \quad (III.12)
 \end{aligned}$$

III.8.1.2 condition de stabilité :

Pour des problèmes d'évolution temporelle, certains schémas sont stables à condition que le pas de temps soit inférieur à une certaine valeur critique en fonction du pas d'espace. La connaissance du critère de stabilité associé à un schéma de différence donnée est nécessaire à l'obtention de calculs stables. Le critère de stabilité dépend de la valeur du facteur de poids " θ " comme indiqué ci-dessous :

- $0 \leq \theta < \frac{1}{2}$: Stable seulement à condition d'avoir : $C_r + C_z \leq \frac{1}{2-4\theta}$;
- $\frac{1}{2} \leq \theta \leq 1$: Stable sans condition quelque soit C_r et C_z ;
- $\theta = \frac{1}{2}$: inconditionnellement stable. (Cranck & Nicolson)

On prend : $\theta = \frac{1}{2}$, l'équation devient :

$$\begin{aligned}
 T_{(i,j)}^{k+1} - T_{(i,j)}^k = &\frac{1}{2} C_r \left[\left(\frac{T_{(i+1,j)}^{k+1} - T_{(i-1,j)}^{k+1}}{2i} + \frac{T_{(i+1,j)}^k - T_{(i-1,j)}^k}{2i} \right) + ((T_{(i-1,j)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i+1,j)}^{k+1}) + \right. \\
 &(T_{(i-1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i+1,j)}^k)) \Bigg] + \frac{1}{2} C_z \left[(T_{(i,j-1)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i,j+1)}^{k+1}) + (T_{(i,j-1)}^k - 2T_{(i,j)}^k + \right. \\
 &T_{(i,j+1)}^k) \Bigg] \quad (III.13)
 \end{aligned}$$

III.8.1.3 Discrétisation des conditions aux limites :

a) La phase initiale :

$$(r_i \leq r \leq r_e : T(i, j, k) = T_0 \quad \text{à } k = 0)$$

b) Phase d'égalisation et de Chauffage :

$$\text{à } 0 < k < t_s, 1 \leq i \leq n_r + 1, j=1, T(i, 1, k) = T_p;$$

$$\text{à } k \geq 0, i = 0, 1 \leq j \leq n_z - 1 : T_{-1,j}^k = T_{i,j}^k - \frac{h}{\lambda}(T_{0,j}^k - T_a), (r = r_i)$$

$$\text{à } k \geq 0, i = n_r, 1 \leq j \leq n_z - 1 : T_{nr+1,j}^k = T_{nr-1,j}^k + \frac{h}{\lambda}(T_a - T_{nr,j}^k) (r = r_e)$$

La méthode traditionnelle pour résoudre l'équation de conduction de chaleur est la méthode de Crank-Nicolson, mais le problème rencontré avec cette méthode réside dans les points suivants :

- Le système matriciel obtenu n'est pas tridiagonal ;
- Matrice très chargée ;
- Lenteur dans l'exécution du programme ;
- Une mémoire à grande échelle est nécessaire pour stocker les éléments de la matrice.

Donc après plusieurs tentatives pour résoudre ce système on n'a pas pu arriver à des résultats stables, d'où la nécessité de l'utilisation d'une autre méthode qui sera l'objet de l'étude ci-après.

III.8.2 Schéma de la direction alternée implicite (ADI) :

III.8.2.1 Discrétisation de l'équation :

En mathématiques la Direction alternatif implicite (ADI) est une méthode des différences finies pour résoudre les équations aux dérivées partielles de type parabolique et elliptique. Elle est plus particulièrement utilisée pour résoudre le problème de conduction de chaleur instationnaire à deux dimensions ou plus.

L'avantage de la méthode ADI est que les équations qui doivent être résolus dans tous les itérations ont une structure simple et sa résolution est facile.

Les nœuds concernés par ce schéma sont indiqués ci-dessous :

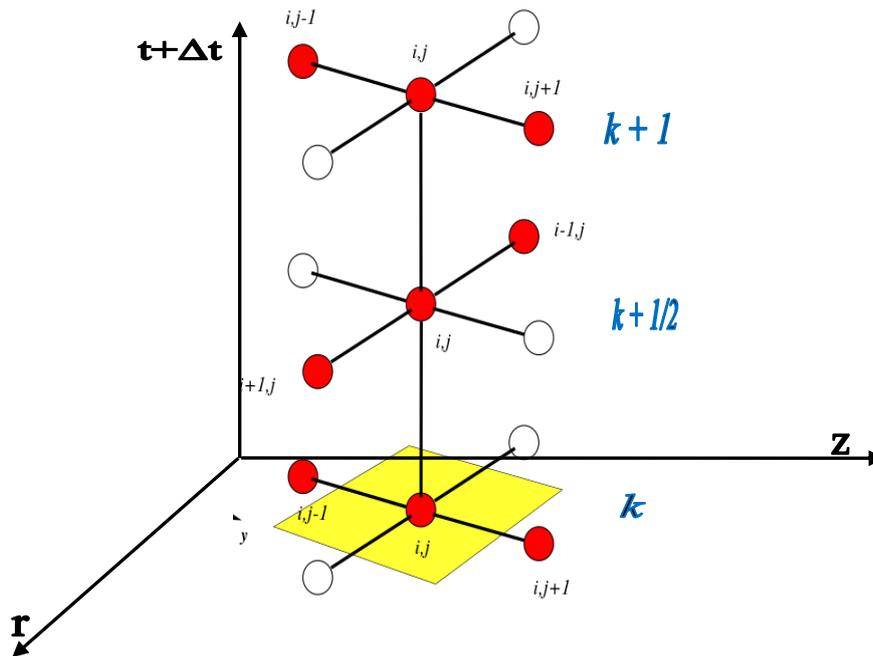


Fig. 3.4 : Schéma numérique de la direction alternée implicite

Les coordonnées (r, z, t) sont représentées par : $t = k$; $r = i \cdot \Delta r$; $z = j \cdot \Delta z$.

L'équation (III.1) devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{(i,j)}^{k+1/2} - T_{(i,j)}^k}{\frac{\Delta t}{2}} ; \quad (\text{III.14})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{i \Delta r} \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)} ; \quad (\text{III.15})$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i,j-1)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2} ; \quad (\text{III.16})$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{(i+1,j)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i-1,j)}^k}{\Delta z^2} . \quad (\text{III.17})$$

En remplace (III.14), (III.15), (III.16), (III.17) dans (III.1)

On obtient :

$$\frac{T_{(i,j)}^{k+1/2} - T_{(i,j)}^k}{\frac{\Delta t}{2}} = a \left(\frac{1}{r} \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1/2} - T_{(i-1,j)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)} + \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i-1,j)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{(i,j+1)}^k - 2T_{(i,j)}^k + T_{(i,j-1)}^k}{\Delta z^2} \right) \quad (\text{III.18})$$

$$A1 T_{(i-1,j)}^{k+1/2} + A2 T_{(i,j)}^{k+1/2} + A3 T_{(i+1,j)}^{k+1/2} = A4 T_{(i,j-1)}^k + A5 T_{(i,j)}^k + A6 T_{(i,j+1)}^k \quad (\text{III.19})$$

$$A1 = \frac{a \cdot \Delta t}{2} \left(\frac{1}{2r\Delta r} - \frac{1}{\Delta r^2} \right), \quad A2 = 1 + \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta r^2}, \quad A3 = -\frac{a \cdot \Delta t}{2} \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r\Delta r} \right); \quad A4 = \frac{a \cdot \Delta t}{2 \cdot \Delta z^2}$$

$$A5 = 1 - \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta z^2} \quad A6 = \frac{a \cdot \Delta t}{2 \cdot \Delta z^2}$$

$$\frac{T_{(i,j)}^{k+1} - T_{(i,j)}^{k+1/2}}{\frac{\Delta t}{2}} = a \left(\frac{1}{r} \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1/2} - T_{(i-1,j)}^{k+1/2}}{2(\Delta r)} + \frac{T_{(i+1,j)}^{k+1/2} - 2T_{(i,j)}^{k+1/2} + T_{(i-1,j)}^{k+1/2}}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{(i,j+1)}^{k+1} - 2T_{(i,j)}^{k+1} + T_{(i,j-1)}^{k+1}}{\Delta z^2} \right) \quad (\text{III.20})$$

$$B1 T_{(i,j-1)}^{k+1} + B2 T_{(i,j)}^{k+1} + B3 T_{(i,j+1)}^{k+1} = B4 T_{(i-1,j)}^{k+1/2} + B5 T_{(i,j)}^{k+1/2} + B6 T_{(i+1,j)}^{k+1/2} \quad (\text{III.21})$$

$$B1 = -\frac{a \cdot \Delta t}{2 \cdot \Delta z^2}, \quad B2 = 1 + \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta z^2}, \quad B3 = -\frac{a \cdot \Delta t}{2 \cdot \Delta z^2}; \quad B4 = \frac{a \cdot \Delta t}{2} \left(\frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r\Delta r} \right) \quad B5 =$$

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

Remarque :

Le schéma de la direction alternée implicite n'est pas concerné par l'étude de stabilité. C'est un schéma inconditionnellement stable.

III.9 Résultats de la simulation :

Afin d'étudier les effets des paramètres de soudage sur la soudure obtenue, on a décidé de faire varier la température initial et la température du miroir. Dans tous les cas on ne fait varier qu'un seul paramètre à la fois : soit la température du miroir, soit la température ambiante suivant le milieu où se fait le soudage.

Le profil radiale est divisé en n_r éléments avec un pas d'espace Δr et le profil axial est divisé en n_z éléments avec un pas Δz . n_r correspond à une distance physique $r_e = 0.02$ m, $r_i = 0.01$ m qui nous donne une épaisseur $e = 0.01$ m, n_z correspond à une longueur $z = 0.035$ m (région la plus proche au plan de soudage), le temps total des deux phases, égalisation et chauffage, est 200 s (cycle standard). Le temps de la phase d'égalisation est $t_{eg} = 25$ s, le temps de la phase de chauffage $t_{ch} = 175$ s. La température initiale prend les valeurs 0 °C, 20 °C et 45 °C, et la température de la plaque chauffante prend 180 °C, 200 °C et 230 °C.

III.9.1. Distribution de la température dans la longueur du tube :

III.9.1.1 Variation de la température initiale :

A cause du changement climatique d'une région à une autre, la température ambiante se diffère d'un milieu saharien chaud à un milieu froid, pour cela on a décidé dans notre étude de faire varier la température initiale (ambiante) pour prédire la différence de la distribution de la température entre les deux milieux afin de bien maîtriser l'opération de soudage. La température de la plaque chauffante est fixé à 230 °C, la température initiale correspondant à la température ambiante varie suivant trois régions, la première à basse température $T_0 = 0$ °C, la deuxième à moyenne température $T_0 = 20$ °C et la dernière région saharienne à haute température $T_0 = 45$ °C.

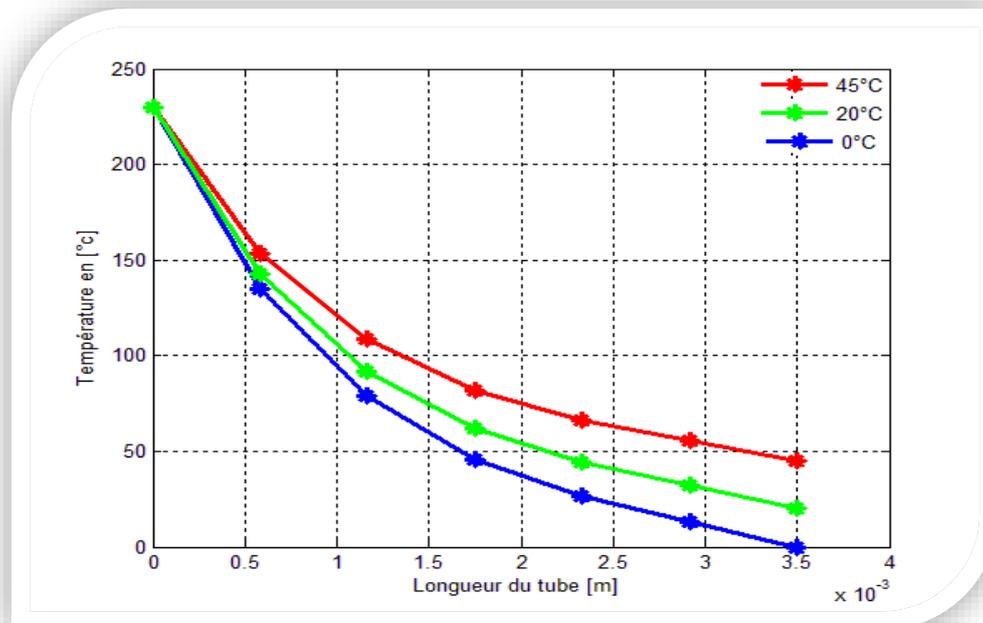


Fig. 3.5 Distribution de la température dans la longueur du tube avec variation de la température initiale

L'Analyse de la distribution de la température dans la longueur du tube montre que la distance au plan de soudage est très importante dans l'augmentation de la température. A travers cette courbe on constate que la température décroît rapidement dans une plage faible de longueur du tube et ce à cause de la conductivité thermique du polyéthylène qui est très faible (0.33 w/m. k).

Pour les trois cas de température ambiante envisagés dans l'étude, on constate que les courbes de l'évolution de la température démarrent par la même valeur qui est celle du miroir et au fur à mesure les courbes se décalent les unes des autres ainsi on constate qu'à 0.15 mm pour les températures initiales 0 °C, 20 °C, 45 °C correspond dans le tube respectivement les valeurs : 60 °C, 80 °C et 100 °C. Pour la distance 0.30 mm pour les mêmes températures initiales, ils correspondent respectivement les températures 10 °C, 25 °C et 55 °C. On peut conclure que le flux de température dans la longueur de soudage croît avec la température initiale.

III.9.1.2 Variation de la température de la plaque chauffante :

Parmi les paramètres de soudage bout à bout (pression, temps, température) la température de la plaque chauffante T_p représente une condition très importante. Dans un cycle standard la température de la plaque est de 230 °C. Dans notre cas d'étude cette température variera selon trois valeurs 230 °C, 200 °C et 180 °C. La température initiale prendra la valeur du milieu extérieur et sera fixée à 20 °C.

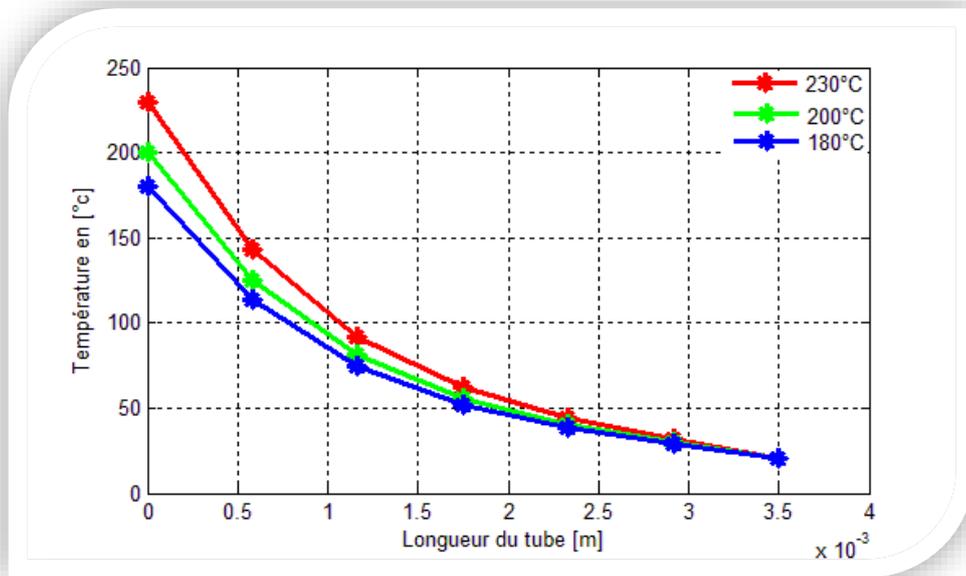


Fig.3.6 Distribution de la température dans la longueur du tube avec variation de la température de la plaque

Dans la figure 3.6 on présente la distribution de la température dans la longueur du tube pour trois cas de température de la plaque chauffante 180 °C, 200 °C et 230 °C. On constate que l'écart de température est important proche de la plaque, puis il diminue avec la courbe qui est monotone décroissante jusqu'à 0.02 mm, puis les trois courbes se convergent et deviennent indépendantes de la longueur du tube.

III.9.2 Distribution de la température dans l'épaisseur du tube :

III.9.2.1 Variation de la température initiale :

Dans cette partie de l'étude la température de la plaque chauffante sera fixée à 230 °C, la température ambiante qui correspond à la température initiale variera suivant trois régions différentes : région à basse température $T_0=0$ °C, région moyenne température $T_0= 20$ °C et région saharienne à haute température $T_0=45$ °C.

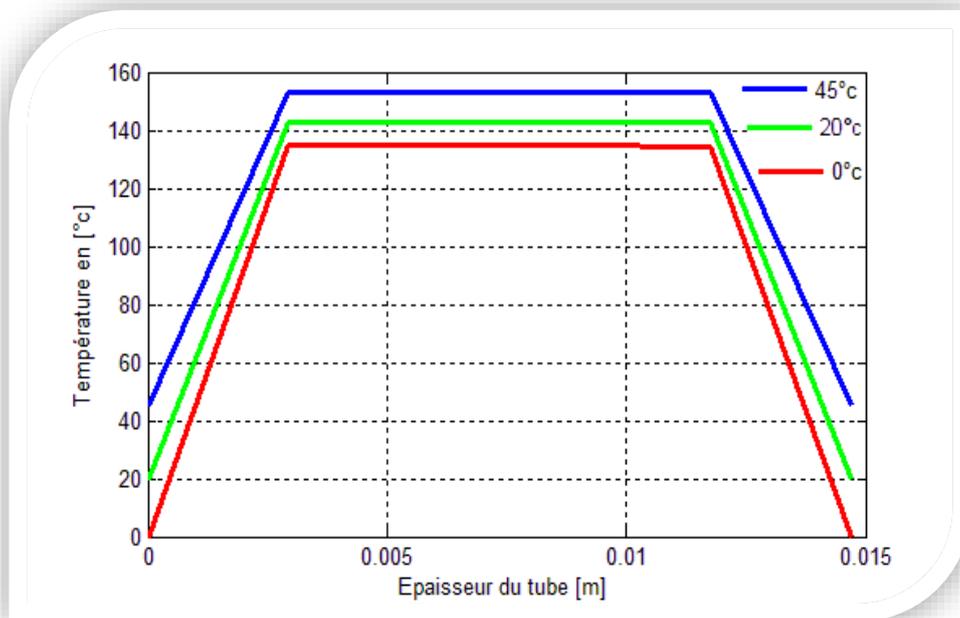


Fig.3.7 Distribution de la température dans l'épaisseur du tube avec variation de la température initiale

Dans la figure 3.7 on présente le champ de température dans l'épaisseur du tube, pour $r_i < r < r_e$, et pour une fixe de z . Le zéro dans le côté gauche représente le rayon intérieur et à droite à 0.015 m le rayon extérieur. Cette est faite pour trois cas de température ambiante. On constate une symétrie dans la distribution de la température dans les deux côtés et la température dans le tube suit l'évolution de la température initiale.

III.9.2.2 Variation de la température de la plaque chauffante :

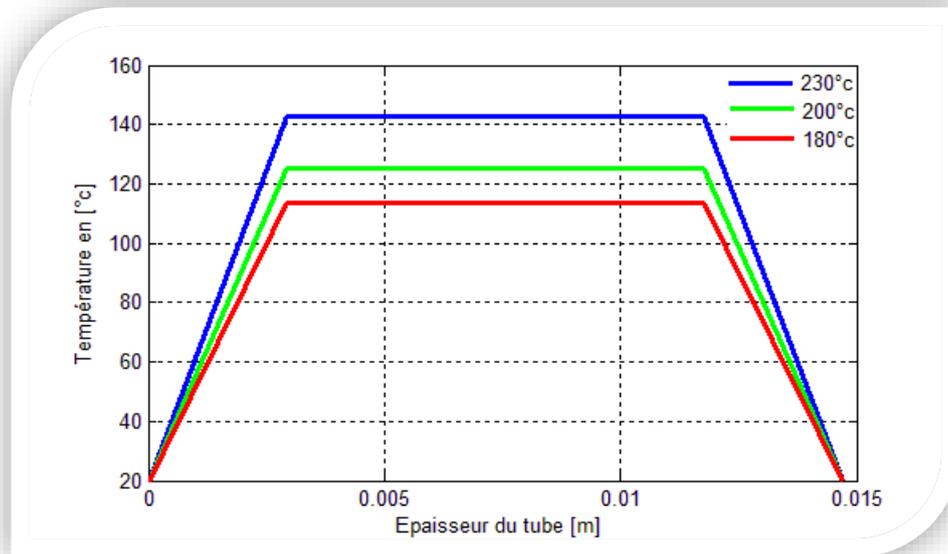


Fig.3.8 : Distribution de la température dans l'épaisseur du tube avec variation de la température de la plaque.

La courbe 3-8 représente la distribution de la température dans l'épaisseur du tube en fonction de la température de la plaque. La température initiale est fixée à 20 °C, la température de la plaque prend trois valeurs $T_p=230$ °C, $T_p=200$ °C et $T_p=180$ °C. On constate une symétrie dans la distribution de la température dans les deux cotés et la température dans le tube suit l'évolution de la température initiale.

III.9.2.3 Distribution de la température dans plusieurs nœuds :

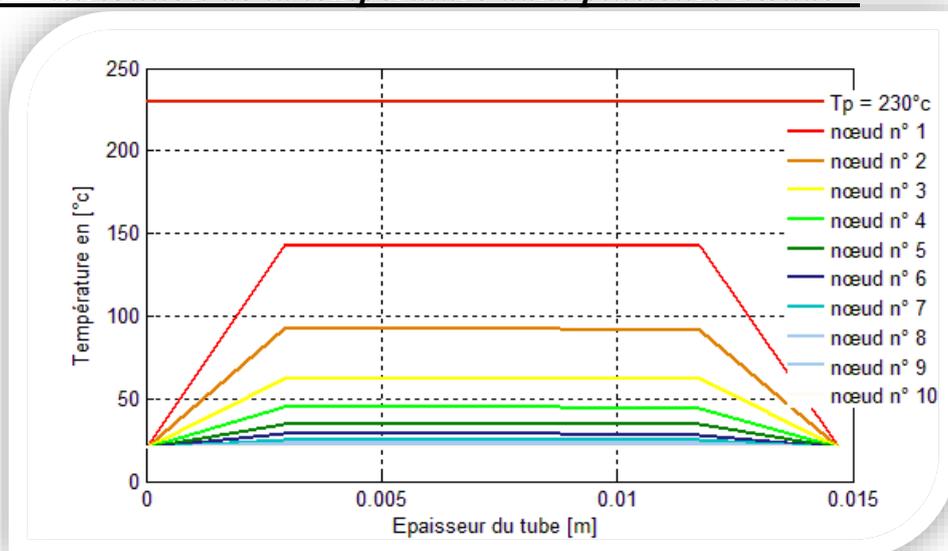


Fig.3.9 : Distribution de la température dans l'épaisseur au plusieurs nœuds

La figure 3.9 présente le champ de température dans l'épaisseur du tube, pour $r_i < r < r_e$, et pour différentes valeurs de z . Le z zéro dans le côté gauche représente le rayon intérieur et à droite à 0.015 m le rayon extérieur. On constate une symétrie dans la distribution de la température dans les deux côtés. Au fur à mesure qu'on s'éloigne de la plaque chauffante, les champs de température en fonction de z ont tendance à se rapprocher.

III.9.3 Distribution de la température en fonction du temps aux nœuds r et z :

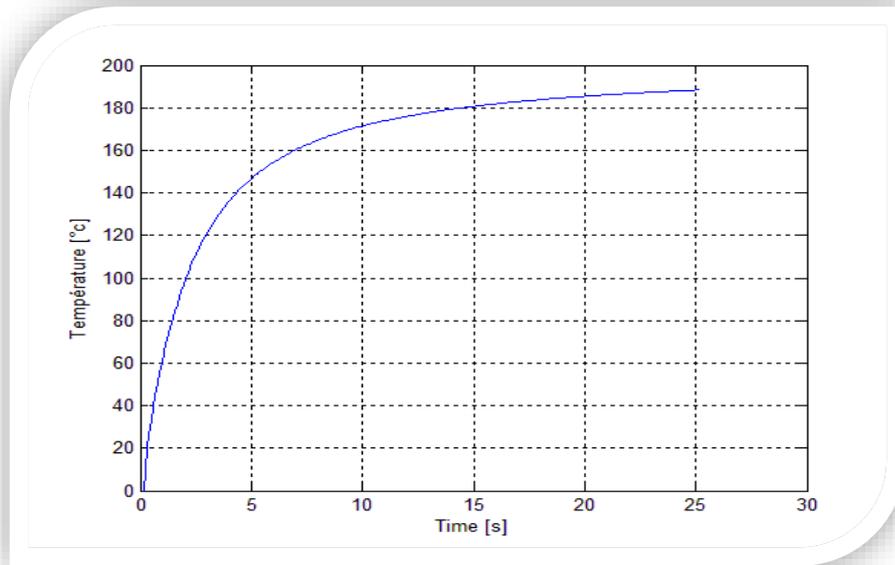


Fig.3.10 Variation de la température dans le temps à l'interface miroir/Tube aux nœuds (r, z) pour les 25 s de la phase d'égalisation

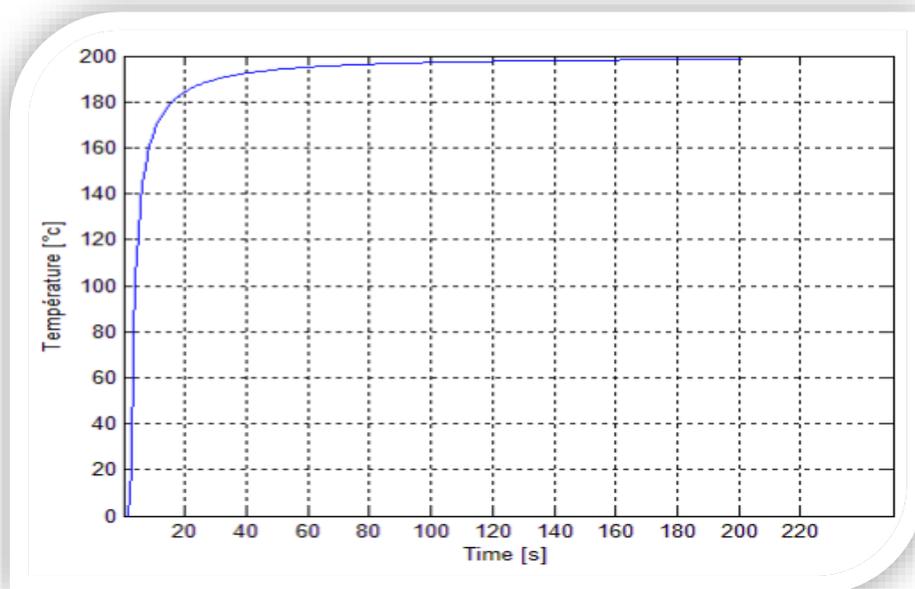


Fig.3.11 Variation de la température dans le temps à l'interface miroir/Tube au nœuds(r,z) pour les (25s (égalisation) et 175s (chauffage)

Les figures 3.11 et 3.12 montrent l'évolution de la température à l'interface miroir/tube lors des phases d'égalisation (0 à 25s) et de chauffage (26 à 200s), la température monte rapidement, pendant 15 s, à 198 °C puis elle continue à augmenter mais avec une pente beaucoup plus faible. La température enregistrée en fin de chauffage reste toujours inférieure à la température du miroir 230 °C.

III.9.4 Validation du modèle numérique à partir du résultat expérimental de M.O.HEHN [22]:

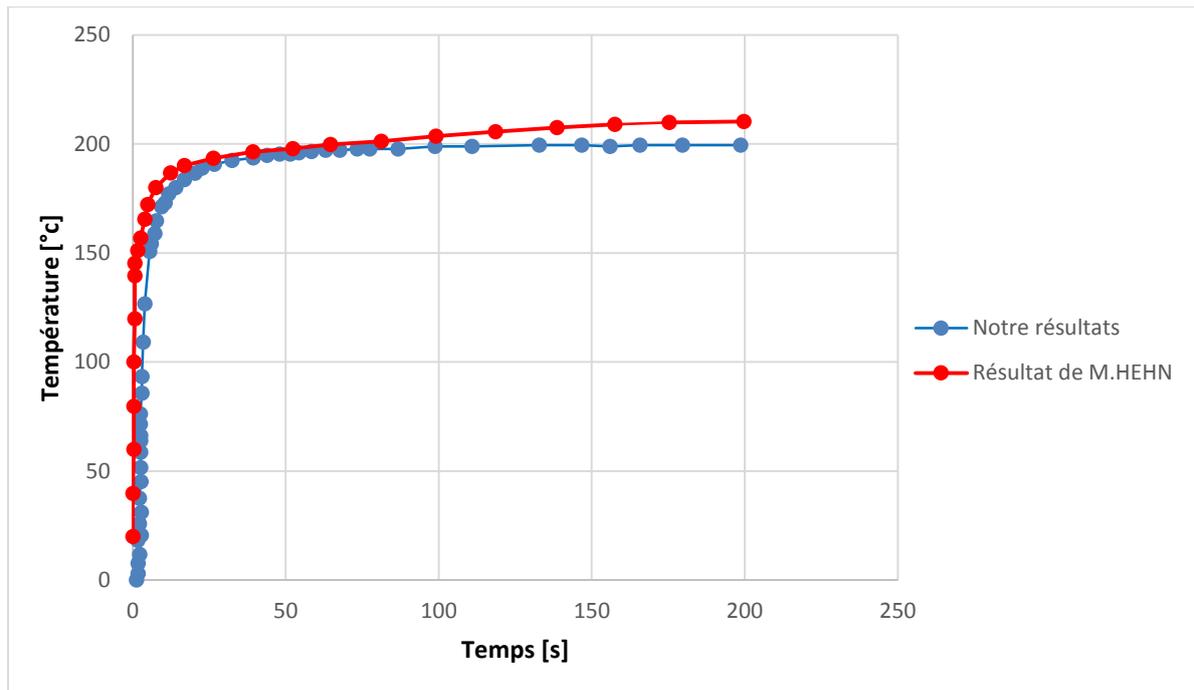


Fig.3.12 Validation du modèle à partir du résultat expérimental de M.O.HEHN

La figure 3.13 montre l'évolution de la température à l'interface miroir/tube mesuré expérimentalement par M.O.HEHN à l'aide des thermocouples qui ont été implantés dans le tube et celle calculé par notre modèle. On constate que les deux courbes se concordent avec un léger décalage. Ce décalage est justifié étant donné que dans notre modèle a été établie en négligeant l'évolution de certaines propriétés.

III.9.5 Représentation graphique en 3D :

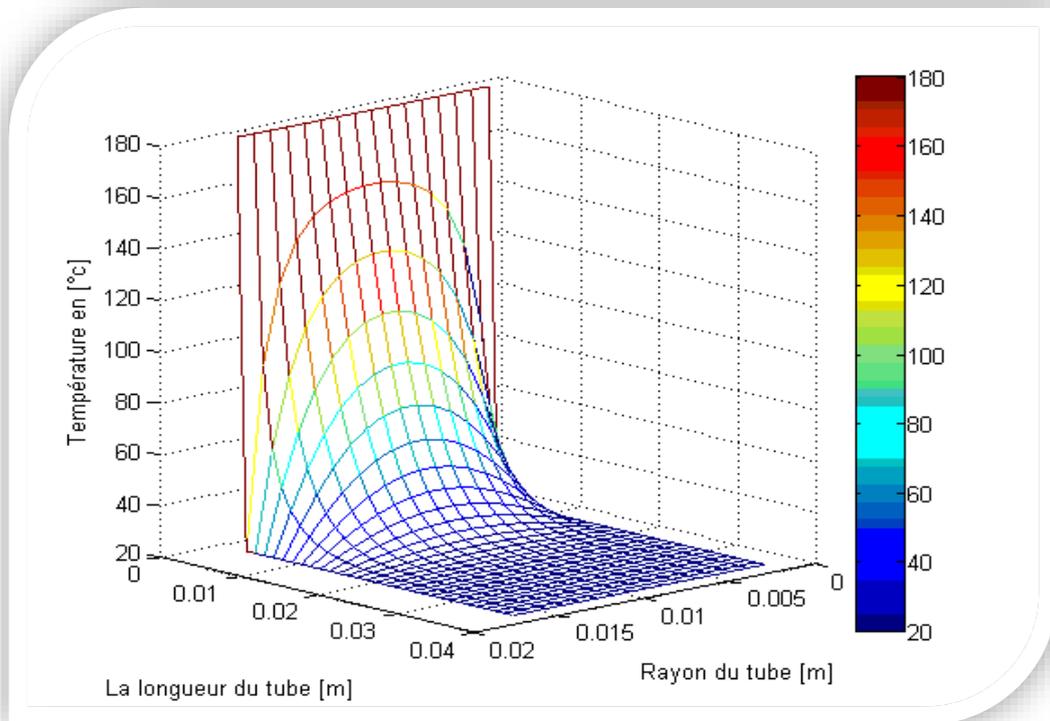


Fig.3.13 : Représentation graphique en 3D

La figure 3.13 on reprend les résultats de l'étude précédente, mais cette fois en le représentant dans graphique en 3D. Il s'agit de la distribution de la température suivant le rayon et la longueur du tube

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

A travers cette étude, nous avons pu mettre en œuvre une solution numérique des plus importantes étapes du soudage bout à bout des tubes en polyéthylène. Les tubes en polyéthylène ont montré leur efficacité dans les applications des réseaux de distribution que ce soit en phase gazeuse ou liquide. Ainsi de nos jours la majorité des tubes des distributions de gaz de ville et d'eau potable se font via des tubes en polyéthylènes. Les raisons de ce choix sont multiples et sont citées dans le premier chapitre de ce mémoire. Pour la résolution du problème thermique du soudage bout à bout nous avons formulé le modèle qui décrit le comportement thermique, il s'agit de deux tubes collés à une plaque chauffante et dans le temps des étapes sont effectuées pour assurer l'opération de soudage, tout le système est gouverné par des équations et des hypothèses appropriées. La solution apportée au problème a débuté par le choix de la méthode de Crank Nicolson. Après développement et formulation en forme matricielle de la solution, la forme non tridiagonale obtenue nous a obligé à recourir à une autre méthode, et ce à cause de l'espace important qui sera occupé dans la mémoire vive des PC. La nouvelle méthode adoptée est basée sur les différences finies, en suivant un chemin implicite de direction alterné. Les résultats obtenus sont très encourageants, la solution est inconditionnellement stable. Le schéma pondéré couplé à un processus itératif a permis de simuler la répartition des températures dans la région proche au plan de soudage. Le code de calcul que nous avons développé a été effectué sous le logiciel Matlab.

En conclusion on peut dire que cette étude a permis d'apporter une approche raisonnable dans la résolution du problème transitoire à deux dimensions au cours du procédé de soudage bout à bout. Ce projet nous a permis aussi de se rapprocher au cas réel du soudage bout à bout, à travers un stage pratique que nous avons effectué dans le complexe CP2K unité Polymed Sonatrach Skikda où nous avons vécu tout le procédé de fabrication de la matière première en HDPE ainsi que toutes les étapes de soudage bout à bout et on s'est familiarisé avec le matériel nécessaire à cette opération. En perspective, une étude complémentaire sera nécessaire pour couvrir toutes les étapes du soudage, en tenant compte du couplage des conditions de l'environnement.

Références Bibliographiques

Références Bibliographies

- [1] Dufour D., Meister E. "Polyethylene électrofusion technique: prediction model of welding quality". Proceedings of the 1989 International Gas Research Conference, Tokyo (Japan), November 6-9, 1989
- [2] Stokes VK. "Experiments on the hot-tool welding of three dissimilar thermoplastics". Polymer. 39:2469 ; 1998
- [3] Wolters M., Venema B. "Le soudage bout à bout de tubes de polyéthylène". Souder. 4:213; 1987
- [4] Yves JANNOT école des Mines Nancy 2 ème année TRANSFERTS THERMIQUES 2011
- [5] J.V. Beck, B. Blackwell and C.R. St Clair. Inverse Heat conduction. – III posed Problems. Wiley Inter science Publication 1985.
- [6] Kim, Y.Y., K.S., Jeong, G.H., Jeong, S., An experimental study on the quantitative interpretation of local convective heat transfer for a plate fin and tube heat exchanger using the lumped capacitance method.. International Journal of heat and Mass Transfer, 49:230-239, 2006.
- [7] Cours de rayonnement olivier PERROT 2010-2011
- [8] Parallel Numerical Solution of 2-D Heat Equation VerenaHorak_, Peter Gruber Department of Scientific Computing, University of Salzburg.
- [9] Heat transfer calculations using finite difference equations; Par David R.Croft David G.Lilley
- [10] N. Point and J.H. Saiac. Equations aux dérivées partielles - mathématiques et méthodes numériques. Cours de l'ESCPI, 2005.
- [11] Résolution d'EDP par différences finis par Pierre Puiseux Janvier 2010
- [12] E. Hairer. Méthodes numériques. Cours de l'université de Genève, 2004.
- [13] V. Legat. Mathématique et méthodes numériques. Cours de l'université catholique de Louvain, 2004.
- [14] Joe D. Ho_man. Numerical Methods for Engineers and Scientists. McGraw- Hill, New York, 1992.
- [15] Thomas, J. W. (1995). Numerical Partial Differential Equations: Finite Difference Methods. Texts in Applied Mathematics 22. Berlin, New York: Springer-Verlag. ISBN 978-0-387-97999-1.

- [16] David R.Croft : Heat transfer calculations using finite difference equations.
- [17] Erwin Kreyszig. Advanced Engineering Mathematics. Wiley, New York, seventh edition, 1993.
- [18] Pimputkar SM. “The effect of joining conditions in the butt fusion of polyethylene pipes”. Proceedings of the Tenth Plastic Fuel Gas Pipe Symposium. 0:38 ; 1987.
- [19] Shillitoe S., Day AJ., Benkreira H. “A finite element approach to butt fusion welding analysis”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 204:95 ; 1990
- [20] Benkreira, H., Shillitoe, S., Day, A. J. and Stafford, T. Cl.,1991 b, Butt fusion joining of polyethylene pipes: a theoretical approach. Presented at Advances in Joining Plastics and Composites, Paper 28, University of Bradford, 10-12 June 1991.
- [21] S.NIOU et all, Etude Thermique du Soudage Bout à Bout des Tubes en Polyéthylène à Haute Densité, *12^{ème} Congrès de Mécanique 21-24 Avril 2015 -(Maroc)*
- [22] Thèse de Doctorat : M.O.HEHN, Analyse Expérimentale et Simulation Thermomécanique Du soudage bout à bout de tubes de Polyéthylène

Site internet :

- [23] <http://www.ryb.fr/expert-blog/>
- [24] <http://www.groupe-chiali.com/index.php/documentations>
- [25] <http://www.thermique55.com/principal/thermique>.
- [26] <http://www.strpe.org/index.php?page=soudage-bout-a-bout>

Livre :

- [27] J.F.Sacadura. Initiation aux transferts thermiques ;
- [28] TAHAR ABBES Miloud, Méthodes des différences finies, Méthodes intégrales et vibrationnelles