



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Par :

Aissaoui Aymen

Hafsi Aymen

Sujet

**Etude paramétrique du phénomène de soudage
du PEHD par électrofusion**

Présenté et soutenu publiquement, le 25 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

M^r HANNACHI M. Tahar

Professeur

Président

M^{me} ZAIDI Latifa

M.A. A

Rapporteur

M^{me} Chelloug F. Zahra

M.A. A

Examineur

Promotion : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrasses, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

- *A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non et exigence et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère.*
- *A mes chères sœurs, qui n'ont pas cessé de m'encourager et tout au long de mes études. Que dieu les protège.*
- *A ma grand père et mère, mes oncles maternels, et ma grande famille, que dieu leur donne une longue et joyeuse vie.*
- *A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connus jusqu'à maintenant, merci pour leurs encouragements.*

Aymen Aissaoui



Dédicace

À mon appui, mon modèle et mon exemple dans la vie, à celui qui m'a appris à vivre dignement, à celui qui m'a appris d'être brave contre tous les obstacles de la vie Mon père vertueux

À la source de tendresse, symbole de sincérité, et du sacrifice, à celle qui fait son possible pour me rendre heureux toujours Ma mère adorée

À ceux avec qui la vie s'adoucit, dont je dépends et dont mon bras est tendu et ma tête levée, ils sont mon appui et la source de ma réussite Mon frère et mes sœurs

Pour celle qui a été ma motivation dans mes moments de faiblesse et un mentor dans mes moments de confusion. Restera toujours ma fierté et mon honneur Ma grande famille

À celui qui n'a jamais quitté mes pensées depuis le moment de sa séparation, je dédie cette graduation à son âme pure Cher grand-père

À ceux qui ont été fraternels et distingués par leur loyauté, avec qui j'ai cheminé sur les chemins de la vie, et qui ont été les meilleurs compagnons Mes amis et collègues.

Avec qui j'ai parcouru un long chemin et sur qui je compte dans toute ma vie, mon frère et ami d'enfance Aymen

Aymen Hafsi





Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah qui nous a donné la force et la patience de surmonter toutes les difficultés afin d'achever ce travail.

Nous tenons à remercier notre superviseur, Mme. Latifa Zaidi qui nous a guidé tout au long de ce travail, ainsi que sa patience et ses précieux conseils durant l'année académique.

Nous tenons à remercier les membres du jury qui ont supervisé l'évaluation de ce travail, M. Mohammed Tahar Hannachi et Mme Fatima Zahra Chelloug.

Nous remercions également M. Abdelkrim Bouaffane et M. Tarek Bouzennada pour tous leurs efforts et leurs conseils qu'ils nous ont fournis pendant la période de réalisation de cette mémoire.

Nous présentons également notre gratitude à tous les professeurs et assistants du département de génie mécanique.

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.



Liste des tableaux

Tableau 1 : classification et désignation des différentes résines de PEHD [5].....	18
Tableau 2 : Récapitulatif des propriétés thermique et mécaniques du PE100 à 23°C.....	19
Tableau 3 : Paramètres de la loi de comportement utilisé par Rosala.....	43
Tableau 4 : Propriétés thermo-physique.....	56

Liste des figures

Figure 1 : (a) ; relation entre la température et la conductivité thermique	19
Figure 2: chauffage des tubes lors du soudage bout à bout.....	20
Figure 3: Miroir de soudage.	21
Figure 4: Les étapes du soudage bout à bout.	21
Figure 5: Raccord électrosoudable.	23
Figure 6: Représentation schématique de raccord électrosoudable.	24
Figure 7: Unité de contrôle et de puissance	25
Figure 8: Aligneur	25
Figure 9 : Manchons électrosoudables.....	26
Figure 10 : Grattage de la surface du tuyau à souder.	27
Figure 11 : Alignement des tuyaux.	27
Figure 12 : la machine de soudage et l'aligneur.	28
Figure 13 : Chute de température due à la résistance de contact thermique. [7]	29
Figure 14 : échange de chaleur par conduction.....	35
Figure 15 : échange de chaleur par convection naturelle.....	36
Figure 16 : échange de chaleur par convection forcée	36
Figure 17 : Présentation du modèle de Rosala et al. [22].....	43
Figure 18 : Représentation schématique d'un manchon électrosoudable. [13]	45
Figure 19 : Evolution du taux de transformation lors de la fusion, α_f , en fonction de la température à différentes vitesses de chauffage	47
Figure 20 : Evolution du taux de transformation α_L en fonction de la température à différentes vitesses de chauffage. Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs du modèle de fusion	48
Figure 21 : Organigramme de calcul numérique.....	52
Figure 22 : Volume de contrôle bidimensionnel.....	52
Figure 23 : Les conditions aux limites	55
Figure 24 : Géométrie de modèle	57
Figure 25 : distribution de la température à différents instants avec et sans espacement	60
Figure 26 : distribution de température côté fil.....	61
Figure 27 : distribution de température côté interface	62
Figure 28 : comparaison entre le modèle avec espacement et sans espacement à côté fil.....	63
Figure 29 : comparaison entre le modèle avec espacement et sans espacement à côté interface	64
Figure 30 : l'influence de la distance entre le fil et l'interface dans le modèle avec espacement au niveau du fil chauffant	65
Figure 31 : l'influence de la distance entre le fil et l'interface dans le modèle avec espacement au niveau de l'interface côté manchon.....	66
Figure 32 : distribution de température entre les fils chauffants en chaque distance entre eux	67
Figure 33 : l'influence de distance entre les fils chauffants sur la distribution de température au niveau d'interface côté manchon	68
Figure 34 : l'influence du diamètre de fil de résistance sur la distribution de température au niveau (a) au niveau de fil chauffant ; (b) de l'interface côté manchon	69

Résumée

Dans notre travail nous avons présentés une étude paramétrique du phénomène de soudage du PEHD par électro-fusion, Le but de notre étude est montré l'influence de plusieurs paramètres sur la distribution de température et sur la qualité de soudure. Nos paramètres d'étude sont : la présence et l'absence de l'espacement entre le manchon et le tube, la distance entre le fil chauffant et l'interface, la distance entre les fils chauffants (influence de position du fil), et en fin le diamètre de fil chauffant.

L'étude est basée sur la résolution de l'équation de la chaleur avec ses conditions aux limites en deux dimensions et en régime transitoire par la méthode du volume finis, on utilise le code de calcul FLUENT qui permet d'obtenir les champs de température en chaque instant et en chaque paramètre de soudage. Ces résultats grâce auxquels nous pourrons atteindre les meilleurs paramètres pouvant être utilisés pour obtenir les meilleures opérations de soudage.

Mots clés : polyéthylène, techniques de soudage, soudage par électrofusion, fluent, fusion, PEHD, simulation.

Abstract

In our work we presented a parametric study of the phenomenon of HDPE welding by electrofusion, the purpose of our study is shown the influence of several parameters on the temperature distribution and on the quality of welding. Our study parameters are: the presence and absence of the spacing between the sleeve and the tube, the distance between the heating wire and the interface, the distance between the heating wires (influence of wire position), and finally the diameter of the heating wire.

The study is based on the resolution of the heat equation with its two-dimensional boundary conditions and in transient state by the finite volume method, the FLUENT computer code is used which makes it possible to obtain the temperature fields at all times and in each welding parameter. These results thanks to which we will be able to achieve the best parameters that can be used to obtain the best welding operations.

Keywords: polyethylene, welding techniques, electrofusion welding, fluent, fusion, HDPE, simulation.

تلخيص

قدمنا في عملنا دراسة الوسائط لظاهرة اللحام HDPE بالصهر الكهربائي، والغرض من دراستنا هو إظهار تأثير العديد من المعلمات على توزيع درجة الحرارة وعلى جودة اللحام. معلمات دراستنا هي: وجود وغياب التباعد بين الغلاف والأنبوب، والمسافة بين سلك التسخين والواجهة، والمسافة بين أسلاك التسخين (تأثير موضع السلك)، وأخيراً قطر سلك التسخين. تعتمد الدراسة على دقة معادلة الحرارة بشروطها الحدية ثنائية الأبعاد وفي حالة عابرة بطريقة الحجم المحدود، يتم استخدام كود الكمبيوتر FLUENT الذي يجعل من الممكن الحصول على حقول درجة الحرارة في جميع الأوقات وفي كل لحام معاملاً. هذه النتائج التي بفضلها سنتمكن من تحقيق أفضل المعايير التي يمكن استخدامها للحصول على أفضل عمليات اللحام.

الكلمات الدالة: البولي إيثيلين، تقنيات اللحام، اللحام بالصهر الكهربائي، الانصهار، HDPE، المحاكاة.

Sommaire

Table des matières

Remerciement	5
Liste des tableaux	6
Liste des figures	7
Résumée	8
Sommaire	11
Introduction générale	15
Chapitre 1 Soudage des thermoplastiques	16
1.1. Introduction	17
1.2. Soudage des thermoplastiques	17
1.3. Les thermoplastiques	17
1.4. Le polyéthylène	18
1.5. Les techniques de soudage des thermoplastiques	20
1.5.1. Le soudage bout à bout	20
1.5.1.1. Les étapes du soudage bout à bout	21
1.5.1.2. Les avantages	22
1.5.1.3. Les inconvénients	22
1.5.2. Le soudage par électrofusion	23
1.5.2.1. La machine de soudage par électrofusion	24
1.5.2.2. Les étapes du soudage par électrofusion	26
1.5.2.3. Des paramètres qui ont un effet sur le résultat de soudage par électrofusion	28
1.5.2.3.1. La résistance de contact	28
1.5.2.3.2. La distance entre la résistance et la paroi intérieure du manchon	29
1.5.2.3.3. La distance entre les fils (résistances)	30
1.5.2.3.4. Le diamètre de la résistance	30
1.5.2.3.5. L'espacement entre le manchon et le tube	30
1.5.2.4. Les avantages	30
1.5.2.5. Les inconvénients	31
1.6. Conclusion	31
Chapitre 2 Transfert de chaleur	33
2.1. Introduction	34
2.2. Transfert de chaleur	34

2.2.1. La conduction	34
2.2.2. La convection	35
2.2.2.1. La convection naturelle	35
2.2.2.2. La convection forcée	36
2.2.2.3. La convection mixte	36
2.2.2.4. Les facteurs liés au transfert de chaleur par convection	37
2.2.3. Le rayonnement	39
2.3. Conclusion	39
Chapitre 3 Modélisation mathématique	40
3.1. Introduction	41
3.2. Bibliographie sur les modèles numériques de soudage	41
3.3. Modélisation de l'électrofusion	45
3.3.1. Modèle physique	45
3.3.2. Modèle mathématique	45
3.3.2.1. Cinétique de fusion	46
3.4. Les hypothèses	48
3.5. Conclusion :	49
Chapitre 4 Modélisation numérique	50
4.1. Introduction	51
4.2. Description du logiciel	51
4.2.1. Principe de fonctionnement	51
4.2.2. Méthode des volumes finis	52
4.3. Discrétisation par la méthode des volumes finis	53
4.4. Les conditions aux limites	55
4.5. Application des conditions aux limites	56
4.6. Les données des matériaux utilisés	56
4.7. Géométrie de modèle	56
4.8. Le maillage	57
4.9. Conclusion	57
Chapitre 5 Résultats et discussion	58
5.1. Introduction	59
5.2. Résultats et discussion	59
5.2.1. Confrontation numérique	59
5.2.2. Les paramètres de soudages	62
5.2.2.1. Comparaison entre le modèle avec espacement et sans espacement	62
5.2.2.2. L'influence de distances entre le fil chauffant et l'interface	65

5.2.2.3. L'influence de distances entre les fils chauffants	66
5.2.2.4. L'influence de diamètre de fil chauffants	69
Conclusion Générale	71
Références Bibliographiques	74



Introduction Générale

Introduction générale

Le soudage par électrofusion est une méthode couramment utilisée pour assembler des tuyaux et des raccords en polyéthylène haute densité (PEHD). Le PEHD est un matériau thermoplastique largement utilisé dans l'industrie pour sa résistance à la corrosion, sa durabilité et sa flexibilité.

L'électrofusion est un processus de soudage par fusion qui utilise un courant électrique pour chauffer les surfaces de contact des pièces à souder. Ces pièces sont équipées d'électrodes intégrées en fil de résistance, qui génèrent la chaleur nécessaire pour ramollir le matériau et lorsque la température souhaitée est atteinte, le courant électrique est interrompu et les pièces sont maintenues en place pendant un certain temps pour permettre à la fusion de se solidifier. Une fois refroidies, les pièces sont solidement soudées, créant une connexion solide et étanche. Grâce à ce processus, des connexions solides et durables peuvent être réalisées, offrant ainsi une solution fiable pour les applications industrielles. En conclusion, le soudage par électrofusion du PEHD est une méthode efficace pour assembler des tuyaux et des raccords en polyéthylène haute densité.

Dans cette étude, notre objectif est d'approfondir l'analyse des paramètres qui affectent le processus de soudage par électrofusion du PEHD afin d'obtenir des soudures complètes et cohérentes.

Pour atteindre à cet objectif notre point de départ avant de s'attaquer au chapitre de modélisation mathématique de notre problème il est le chapitre deux qui présente les différents phénomènes de transfert de chaleur mis en jeu lors du soudage par électro-fusion.

Dans le chapitre quatre nous utilisons un logiciel de simulation Fluent, qui nous permette de modéliser numériquement et de suivre thermiquement l'influence de ces paramètres étudiés sur le phénomène de soudage. Ces simulations nous fourniront des informations et des résultats grâce auxquels nous pourrions atteindre les meilleurs paramètres pouvant être utilisés pour obtenir les meilleures opérations de soudage.



Chapitre 1 Soudage des thermoplastiques

1.1. Introduction

Le soudage des thermoplastiques est une technique essentielle dans le domaine de l'assemblage des matériaux polymères. Il consiste à fusionner des pièces en thermoplastique pour former des liaisons solides. Cette méthode est couramment utilisée dans divers secteurs industriels.

Dans ce chapitre, nous examinerons les matériaux et les techniques utilisés dans le processus du soudage des thermoplastiques et les paramètres affectant le processus du soudage.

1.2. Soudage des thermoplastiques

Le soudage des thermoplastiques est une technique de soudage couramment utilisée pour joindre des matériaux en thermoplastique tels que le PVC, le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP). Les thermoplastiques sont des matériaux qui peuvent être fondus et moulés à plusieurs reprises sans perdre leurs propriétés chimiques ou physiques. Le soudage des thermoplastiques implique de chauffer les surfaces à souder jusqu'à leur point de fusion, puis de les joindre ensemble pour former une liaison solide.

Il existe plusieurs techniques de soudage des thermoplastiques, notamment le soudage par extrusion, soudage par friction, soudage par ultrasons, soudage bout à bout et le soudage par électrofusion. Chacune de ces techniques a ses avantages et ses inconvénients, et le choix de la méthode dépend des besoins spécifiques de l'application.

1.3. Les thermoplastiques

Le thermoplastique est un type de matériau plastique qui est souple et malléable à une température élevée et peut être formé en différentes formes. Contrairement aux thermodurcissables, qui durcissent définitivement lorsqu'ils sont chauffés, les thermoplastiques peuvent être chauffés, fondus et refroidis plusieurs fois sans perdre leurs propriétés physiques ou chimiques.

Les thermoplastiques sont utilisés dans une grande variété d'applications industrielles et commerciales, notamment dans la fabrication de bouteilles en plastique, de pièces automobiles, d'emballages alimentaires, de fils et de câbles électriques, de jouets, de tuyaux et de tubes, et de films plastiques. Les thermoplastiques les plus courants comprennent le polypropylène, le polyéthylène, le PVC, le polystyrène et le polycarbonate.

Les avantages des thermoplastiques incluent leur capacité à être moulés en différentes formes et tailles, leur résistance à l'usure et à la corrosion, leur légèreté, leur résistance à la chaleur et à la plupart des produits chimiques, leur faible coût et leur recyclabilité. Cependant, leur faible

résistance à l'impact et à la rupture, ainsi que leur tendance à se ramollir et à se déformer à des températures élevées, sont des inconvénients à prendre en compte lors de leur utilisation.

1.4. Le polyéthylène

Le PE (polyéthylène) est un matériau thermoplastique largement utilisé dans la production de divers produits en plastique. Il existe deux types principaux de PE : le PEHD (polyéthylène haute densité) et le PELD (polyéthylène basse densité). Selon sa résistance à la contrainte circulaire minimale (CCM) qu'il présente à 20 °C pendant 50 ans [4], on le retrouve sous différentes appellations (Tableau 1).

Tableau 1 : classification et désignation des différentes résines de PEHD [5]

Désignation	CCM (MPa)
PE 32	3.2
PE 40	4
PE 63	6.3
PE 80	8
PE100	10

Le PEHD (Polyéthylène haute densité) PE 100 est une variante spécifique de PEHD qui a une densité élevée et une résistance accrue à la pression et à la traction. Il est utilisé dans les applications nécessitant une haute résistance à la rupture, comme les tuyaux d'eau et de gaz, les canalisations et les tubes industriels.

Le tableau suivant (Tableau 2) récapitule les principales propriétés mécaniques et thermiques du PE100 à l'état solide et à température ambiante (23 °C) fournies par le fabricant Solvay Polyoléfines Europe. Sa masse volumique, sa conductivité thermique et sa chaleur massique. [1]

Tableau 2 : Récapitulatif des propriétés thermique et mécaniques du PE100 à 23°C

Matière	Masse volumique (Kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m. K)	Chaleur massique (J/Kg. K)	Température de fusion (°C)
PE100	959.5	0.32-0.4	2600	128

Les tubes de PE sont fabriqués par extrusion à partir de granulés. Ces derniers sont placés dans une extrudeuse qui chauffe et fond les granulés, les pousse à travers une filière qui donnera la forme finale du tube. Le tube transite par la suite dans une enceinte de refroidissement puis dans une étireuse qui maintient le tube tendu. [2]

Les relations entre la température et les propriétés du matériau d'une résine de polyéthylène, que la conductivité thermique, la densité et la chaleur spécifique, sont présentés dans les (Figures 1) [3] :

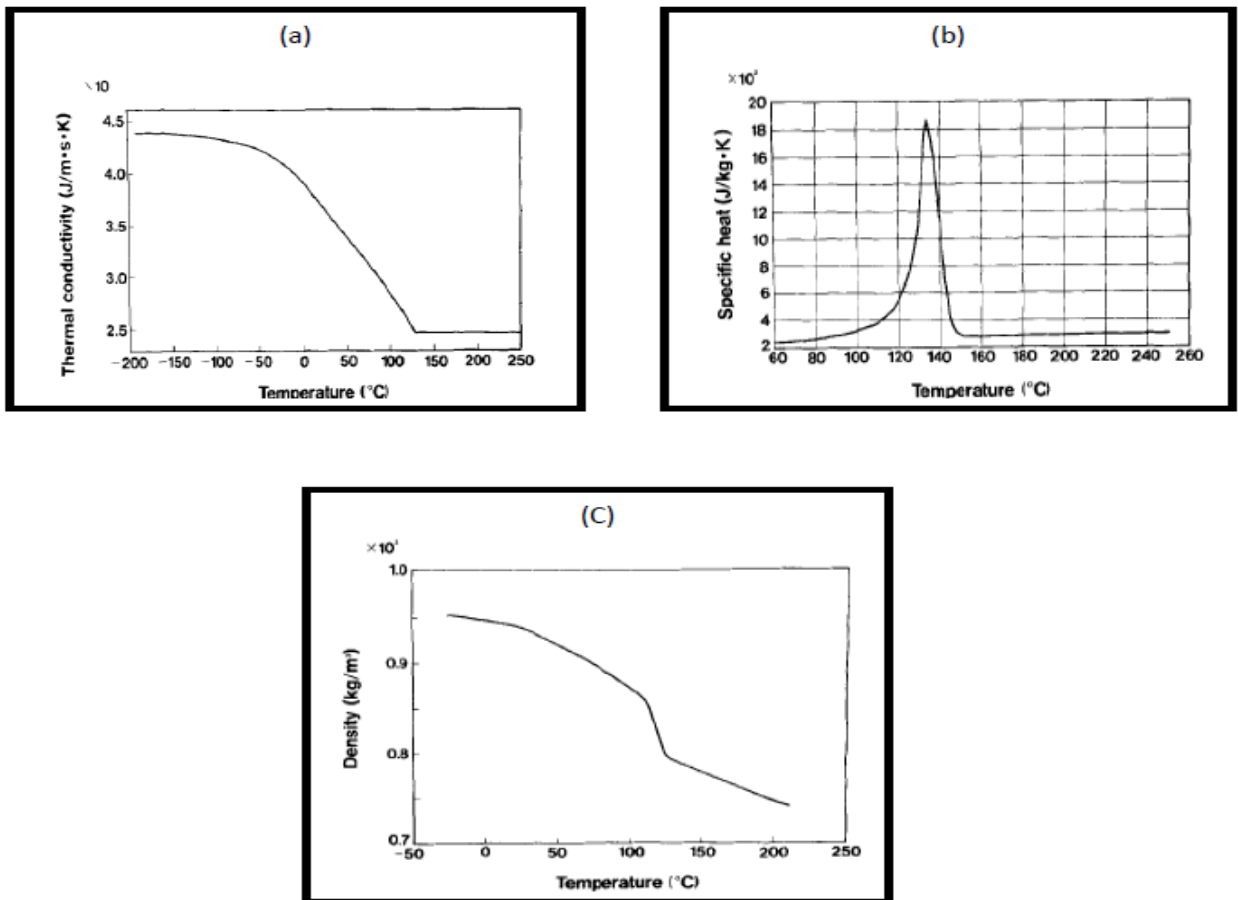


Figure 1 : (a) ; relation entre la température et la conductivité thermique
 (b) ; relation entre la température et la chaleur spécifique
 (c) ; relation entre la température et la masse volumique

1.5. Les techniques de soudage des thermoplastiques

Les techniques de soudage des thermoplastiques peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment les matériaux thermoplastiques utilisés, la taille et la forme des pièces à souder, les équipements disponibles, ainsi que le domaine d'application. Voici quelques exemples de techniques de soudage des thermoplastiques :

1.5.1. Le soudage bout à bout

Le soudage bout à bout, également connu sous le nom de soudage à la jonction, est une méthode de soudage qui consiste à joindre les bords de deux matériaux de même type en les faisant fondre et en les fusionnant ensemble. Cette méthode est couramment utilisée pour souder des tuyaux en métal, en plastique et en d'autres matériaux (Figure 2).

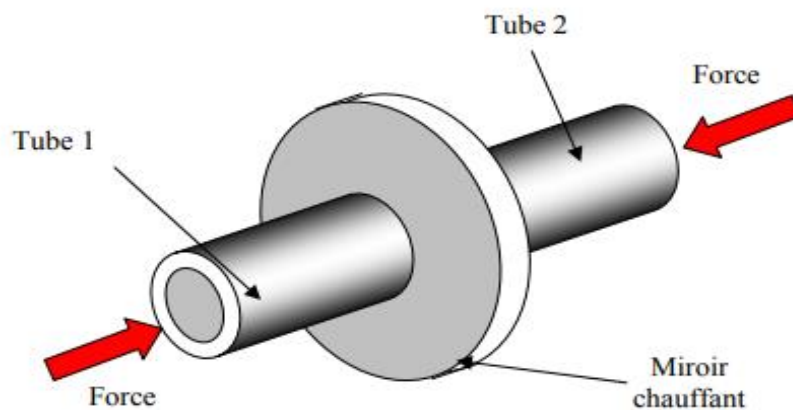


Figure 2: chauffage des tubes lors du soudage bout à bout.

Le processus de soudage bout à bout implique le chauffage des bords des deux pièces à souder à l'aide d'une plaque chauffante jusqu'à ce qu'ils atteignent leur point de fusion. Une fois que les bords sont suffisamment chauds, ils sont pressés ensemble pour former une soudure solide. Cette technique nécessite un équipement spécialisé, notamment une plaque chauffante, une presse de soudage et des gabarits pour maintenir les pièces en position pendant la soudure.

Une fois que les pièces sont positionnées, une source de chaleur (un miroir) (Figure 3) est appliquée à l'extrémité des pièces, jusqu'à ce qu'elles atteignent leur point de fusion.



Figure 3: Miroir de soudage.

Une fois que les pièces ont fondu, la source de chaleur est retirée et les pièces sont pressées ensemble pour les fusionner. Cette pression est généralement appliquée à l'aide d'un outil de soudage.

1.5.1.1. Les étapes du soudage bout à bout

Le soudage bout à bout peut être divisé en quatre étapes (Figure 4) :

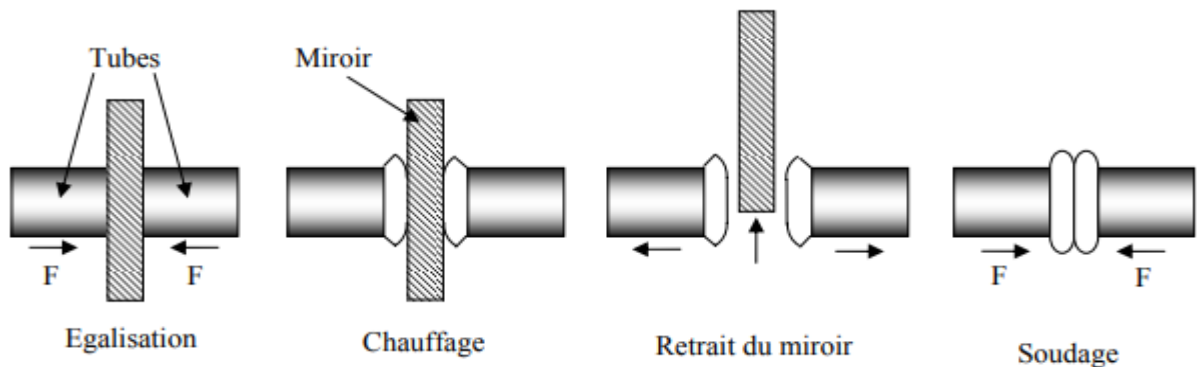


Figure 4: Les étapes du soudage bout à bout.

➤ Étape 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. [1]

➤ **Étape 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. [1]

➤ **Étape 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. [1]

➤ **Étape 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. [1]

1.5.1.2. Les avantages

Parmi les avantages du soudage bout à bout, on peut citer :

- **Esthétique** : Les soudures bout à bout sont généralement invisibles, ce qui les rend idéales pour les applications où l'esthétique est importante, telles que les projets architecturaux ou la fabrication de produits haut de gamme.
- **Polyvalence** : Le soudage bout à bout est une technique de soudage très polyvalente qui peut être utilisée sur une grande variété de matériaux, y compris les métaux ferreux et non ferreux.
- **Résistance à la corrosion** : Les soudures bout à bout sont résistantes à la corrosion, ce qui les rend appropriées pour les applications dans les environnements corrosifs.

1.5.1.3. Les inconvénients

Bien que le soudage bout à bout présente de nombreux avantages, il peut également présenter certains inconvénients. Voici quelques-uns des inconvénients les plus courants du soudage bout à bout :

- Temps de préparation plus long : La préparation des pièces pour le soudage bout à bout peut prendre plus de temps que pour d'autres techniques de soudage, ce qui peut allonger les temps de production.
- Risques de déformation : Le soudage bout à bout peut entraîner une déformation des pièces soudées si les conditions de soudage ne sont pas correctement contrôlées. La déformation peut affecter la qualité de la structure soudée et peut nécessiter des opérations de redressement supplémentaires.
- Sensibilité aux défauts : Le soudage bout à bout peut être sensible aux défauts tels que les fissures, les porosités ou les inclusions de matériaux étrangers, qui peuvent affaiblir la résistance de la structure soudée.
- Limitations de taille : Le soudage bout à bout peut être limité par la taille des pièces à souder, car les pièces doivent être placées l'une à côté de l'autre pour être soudées bout à bout.

1.5.2. Le soudage par électrofusion

La technique de soudage par électrofusion est une méthode de soudage utilisée pour souder des tuyaux en PEHD et d'autres matériaux thermoplastiques. Cette technique est souvent utilisée pour connecter des tuyaux de même diamètre ou de diamètres différents, ainsi que pour les réparations de tuyauterie (Figure 5).



Figure 5: Raccord électrosoudable.

Le principe de l'électrofusion est de faire fondre les bords des tuyaux à souder, puis de les fusionner ensemble en appliquant une pression constante pendant que la matière fondue refroidit et se solidifie. Cette technique de soudage utilise une unité de contrôle de soudage qui fournit une tension et un courant électrique précis, ainsi qu'une résistance de chauffage qui est placée entre les deux tuyaux à souder (Figure 6).

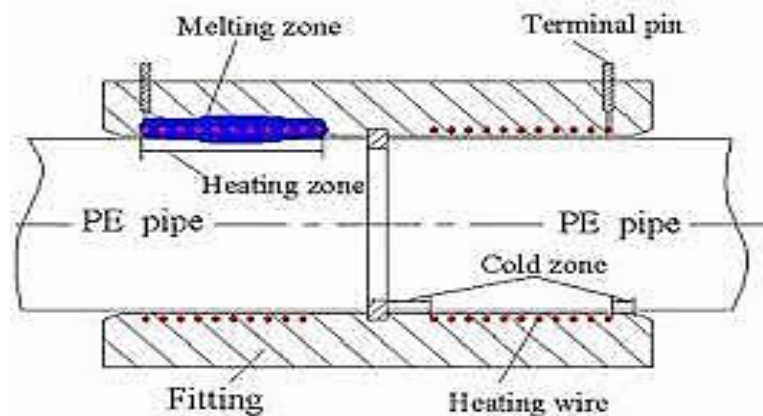


Figure 6: Représentation schématique de raccord électrosoudable.

Le processus d'électrofusion commence par l'insertion des extrémités des tuyaux à souder dans des raccords électrofusionnables. Les raccords sont équipés d'un fil chauffant ou d'une résistance qui est connectée à l'unité de contrôle de soudage. Lorsque l'électricité est appliquée, la résistance chauffe et fait fondre les bords des tuyaux et les parois internes du raccord. La fusion se produit alors naturellement, créant une connexion solide et durable entre les tuyaux et le raccord.

1.5.2.1. La machine de soudage par électrofusion

Les machines de soudage par électrofusion sont composées de plusieurs éléments essentiels qui permettent d'effectuer le processus de soudage. Voici une description des principaux composants d'une machine de soudage par électrofusion :

- **Unité de contrôle et de puissance :** C'est le cœur de la machine de soudage par électrofusion. L'unité de contrôle fournit l'énergie électrique nécessaire au processus de soudage et permet de régler les paramètres tels que la température et la durée de fusion. Elle est équipée d'un écran d'affichage et de boutons de contrôle pour faciliter la programmation et la surveillance du processus (Figure 7).



Figure 7: Unité de contrôle et de puissance

- **Aligneur** : il contient des pinces qui maintiennent fermement les tubes en place pendant le processus de soudage. Il est généralement équipé de mâchoires amovibles pour s'adapter à différentes tailles de tuyaux ou des raccords. Les pinces de soudage sont conçues pour assurer un bon contact électrique et une pression adéquate pendant la fusion des matériaux (Figure 8).



Figure 8: Aligneur

- **Les manchons électrosoudables** : également connus sous le nom de manchons d'électrofusion ou de manchons électrofusionnables, ils sont conçus pour connecter de manière solide et étanche les extrémités des tuyaux en matériaux thermoplastiques (Figure 8). Voici une description des manchons électrosoudables :

- ❖ **Matériau** : Les manchons électrosoudables sont fabriqués à partir du même matériau thermoplastique que celui des tuyaux à souder, assurant ainsi une compatibilité

parfaite en termes de propriétés physiques et chimiques. Les matériaux couramment utilisés comprennent le PE (PEHD, PEMD, PELD) et le PP.

❖ **Structure** : Les manchons électrosoudables sont constitués de deux parties principales :

- **Corps principal** : C'est la partie centrale du manchon qui s'insère entre les deux extrémités des tuyaux à souder. Le corps principal est équipé d'un anneau ou d'un profil d'électrofusion sur sa surface interne, qui permet la connexion électrique lors du processus de soudage.

- **Zones de transition** : Les zones de transition se trouvent à chaque extrémité du manchon électrosoudable. Elles sont conçues pour faciliter la transition en douceur entre les dimensions du manchon et celles des tuyaux à souder, garantissant ainsi une connexion homogène.

❖ **Tailles et dimensions** : Les manchons électrosoudables sont disponibles dans différentes tailles et dimensions pour s'adapter aux différents diamètres de tuyaux utilisés dans les applications de soudage.



Figure 9 : Manchons électrosoudables

1.5.2.2. Les étapes du soudage par électrofusion

Il est crucial de respecter un mode opératoire très précis lors de l'utilisation du PEHD par électrofusion. L'importance de l'installation l'emporte sur celle de la soudure. Sinon, il y a un risque d'obtenir une soudure de mauvaise qualité. Les Quatre étapes du soudage par électrofusion sont les suivantes :

➤ **Étape 1 : Préparation**

Pendant le transport, la manipulation et la mise en place de tuyaux en PE, il est possible de les endommager si nous ne faisons pas d'attention. Des ruines et des râpures inférieures au 10 % de l'épaisseur de parois sont admises pour les tuyaux d'eau 5 % pour les tuyaux de gaz. Nettoyer la surface d'union du tuyau avec un chiffon ou une serviette en papier afin de ne pas laisser des résidus. [6]

➤ **Étape 2 : Grattage**

Pour garantir un bon assemblage, la zone de la surface du tuyau à souder doit être gratté afin d'éliminer toutes impuretés, de la saleté, de la graisse, etc., qui peuvent contaminer la soudure. La longueur à gratter doit être marqué par un feutre et il faut utiliser un gratteur pivotant. Pour des prises en charge, nous pouvons utiliser un gratteur manuel (Figure 10). [6]



Figure 10 : Grattage de la surface du tuyau à souder.

➤ **Étape 3 : Alignement**

La partie la PLUS importante pour le procédé d'électrofusion, est celle qui garantit que les tuyaux ne bougent pas et qu'ils soient alignés pendant les phases de chauffage et de refroidissement. Si le tuyau bouge pendant la phase de refroidissement, l'assemblage échouera. Les aligneurs aident à effectuer une bonne union, car ils évitent que le mouvement des tuyaux (Figure 11). [6]



Figure 11 : Alignement des tuyaux.

➤ Étape 4 : Soudage

Les accessoires sont soudés avec une machine par électrofusion (EF), soit manuel soit automatique avec lecteur de code de barres ou avec carte (Figure 12). [6]

- Connecter la machine à une fourniture électrique.
- Suivre les instructions de l'écran et choisir Code de barre (par exemple).
- Brancher le câble de la machine à l'accessoire et lire le code de barres. Commencer la soudure.
- Une fois la soudure finie, il faut laisser refroidir avant d'enlever l'aligneur.



Figure 12 : la machine de soudage et l'aligneur.

1.5.2.3. Des paramètres qui ont un effet sur le résultat de soudage par électrofusion

Plusieurs paramètres peuvent influencer le résultat du soudage par électrofusion. Voici quelques-uns des paramètres :

1.5.2.3.1. La résistance de contact

Il est important de reconnaître que, dans les systèmes composites, la chute de température à travers l'interface entre les matériaux peut être appréciable. Ce changement de température est attribué à ce que l'on appelle la résistance thermique de contact, $R_{t,c}$. L'effet est illustré à la (Figure 13), et pour une unité de surface de l'interface. [7]

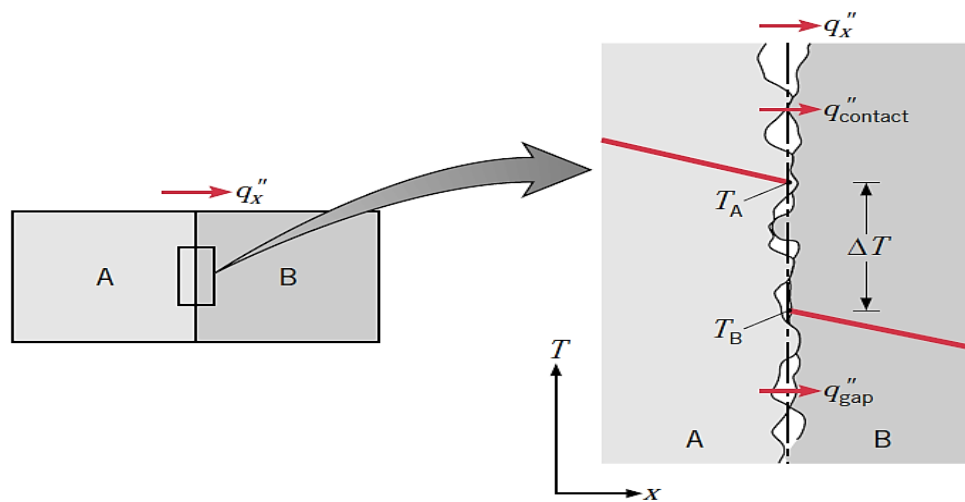


Figure 13 : Chute de température due à la résistance de contact thermique. [7]

L'existence d'une résistance de contact finie est due principalement aux effets de rugosité de surface. Les points de contact sont entrecoupés d'espaces qui sont, dans la plupart des cas, remplis d'air. Le transfert de chaleur est donc dû à la conduction à travers la zone de contact réelle et à la conduction et/ou au rayonnement à travers les espaces. La résistance de contact peut être vue comme deux résistances parallèles : celle due aux points de contact et celle due aux entrefers. La zone de contact est généralement petite, et en particulier pour les surfaces rugueuses, la contribution majeure à la résistance est apportée par les espaces. [7]

1.5.2.3.2. La distance entre la résistance et la paroi intérieure du manchon

La distance entre la résistance et le manchon est un paramètre géométrique important dans le soudage par électrofusion. Elle fait référence à la distance séparant l'élément chauffant (résistance) du manchon de fusion lors du processus de soudage.

La résistance est l'élément qui génère la chaleur nécessaire pour faire fondre les surfaces des pièces à souder. Le manchon de fusion, quant à lui, est la partie du raccord qui entoure les extrémités des pièces à souder et qui fusionne avec elles lors du soudage par électrofusion.

La distance affecte la répartition de la chaleur, la taille et la forme de la zone de fusion. Une distance adéquate permet une fusion uniforme des surfaces des pièces et du manchon, assurant une soudure de qualité. Une distance inappropriée peut entraîner des défauts de soudure tels que des vides.

1.5.2.3.3. La distance entre les fils (résistances)

La distance entre les fils est un autre paramètre géométrique essentiel dans le processus de soudage par électrofusion. Elle fait référence à la distance séparant deux éléments chauffants (résistances) utilisés dans le dispositif de soudage par électrofusion.

La modification de la distance entre les résistances peut affecter la répartition de la chaleur, ainsi que la taille et la forme de la zone de fusion, comme mentionné précédemment. Il peut également affecter sur le temps nécessaire pour atteindre la fusion complète, entraîner des défauts de soudure ou une résistance mécanique réduite, et avoir un impact sur l'efficacité globale du processus de soudage par électrofusion. Une distance incorrecte peut entraîner une perte d'énergie, une augmentation de la consommation d'énergie ou une réduction de l'efficacité thermique, ce qui peut avoir des implications sur la qualité de la soudure et les coûts de production.

1.5.2.3.4. Le diamètre de la résistance

Le diamètre de la résistance est un paramètre important dans le soudage par électrofusion. Le diamètre de la résistance influence la répartition de la chaleur générée pendant le processus de soudage. Une résistance de plus grand diamètre peut produire une répartition thermique plus uniforme sur la zone de soudage, ce qui peut favoriser une fusion homogène et complète des matériaux à souder. Il est important de choisir le diamètre de la résistance en fonction de la taille des pièces à souder et des exigences de la soudure souhaitée. Il est également important de trouver un équilibre entre le diamètre de la résistance et la durée du processus de fusion pour éviter une surchauffe ou une fusion incomplète. Le diamètre de la résistance peut également influencer la durée nécessaire pour atteindre la fusion complète des matériaux à souder.

1.5.2.3.5. L'espacement entre le manchon et le tube

L'espacement est l'un des paramètres clés qui peuvent avoir un effet sur le résultat du soudage par électrofusion. Cet espacement fait référence à la distance entre les extrémités du manchon et du tube lorsqu'ils sont assemblés avant le soudage.

L'espacement entre le manchon et le tube est essentiel pour obtenir une fusion adéquate du matériau. Si l'espacement est trop grand, la chaleur générée par le courant électrique peut ne pas être suffisante pour atteindre une fusion complète. Si l'espacement est trop faible, il peut entraîner des problèmes tels que brûlures ou déformations excessives. La répartition de la chaleur peut également avoir un impact direct sur la qualité du joint soudé.

1.5.2.4. Les avantages

Le soudage par électrofusion présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes de soudage, notamment :

- Une méthode de soudage propre, sans l'utilisation de colle ou de solvants.
- Une méthode de soudage efficace, qui permet de créer des joints en quelques minutes.
- Une méthode de soudage qui peut être utilisée pour assembler des tuyaux de différentes tailles et formes, ainsi que pour réaliser des coudes et des raccords en T.
- Une méthode de soudage qui nécessite peu d'outils et de matériel, ce qui la rend facile à utiliser et à entretenir.
- Une méthode de soudage qui permet de réduire les coûts de maintenance et de réparation, car les joints sont durables et résistants aux produits chimiques et aux chocs.

1.5.2.5. Les inconvénients

Cependant, le soudage par électrofusion présente également quelques inconvénients :

- Le coût initial de l'équipement d'électrofusion peut être élevé par rapport à d'autres méthodes de soudage.
- Le soudage par électrofusion nécessite une source d'alimentation électrique fiable et stable.
- La qualité de la préparation des surfaces de soudage peut affecter la qualité du joint soudé.
- Le soudage par électrofusion peut être difficile à réaliser dans des conditions météorologiques extrêmes, telles que le froid ou la pluie.

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le soudage des thermoplastiques, où nous avons donné la définition du polyéthylène, qui représente l'un des types de matériaux les plus importants utilisés en raison de ses bonnes propriétés thermiques dans un tel domaine, puis nous sommes passés à identifier certains des procédés utilisés en soudage thermique comme le soudage par électrofusion qui fait l'objet de notre étude où nous l'avons défini et mentionné ses étapes et certains paramètres qui s'y rattachent et qui peuvent avoir un impact sur la qualité de la soudure obtenue.

Dans le chapitre suivant, nous donnerons une définition des phénomènes thermiques liés au procédé de soudage afin d'approfondir et de mieux le comprendre sous l'aspect thermique.



Chapitre 2 Transfert de chaleur

2.1. Introduction

De l'étude de la thermodynamique, nous avons appris que l'énergie peut être transférée par les interactions d'un système avec son environnement. Ces interactions sont appelées travail et chaleur.

Dans ce chapitre, nous donnerons des détails sur les types de transfert de chaleur afin de comprendre et de connaître leur impact sur les procédés de soudage, car chaque type a des caractéristiques et des effets appliqués lorsque certaines conditions sont remplies.

2.2. Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est un phénomène physique qui se produit lorsque de l'énergie thermique est transférée d'un corps à un autre en raison d'une différence de température entre les deux corps.

Il existe trois modes de transfert de chaleur :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

2.2.1. La conduction

C'est une mode de transfert de chaleur créé par le mouvement des particules qui se produit lorsque deux objets en contact direct échangent de l'énergie thermique. Lorsque la température de l'un des objets est plus élevée que celle de l'autre, l'énergie thermique se déplace naturellement de l'objet le plus chaud vers l'objet le plus froid.

La loi de conduction thermique est également appelée la loi de Fourier, peut être exprimée mathématiquement par la formule suivante :

$$\Phi = -\lambda S \text{ grad}(T) \dots \dots \dots (2 - 1)$$

- Φ Flux de chaleur transmis par conduction (W)
- λ Conductivité thermique du milieu ($\text{w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$)
- T Température (k)
- S Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

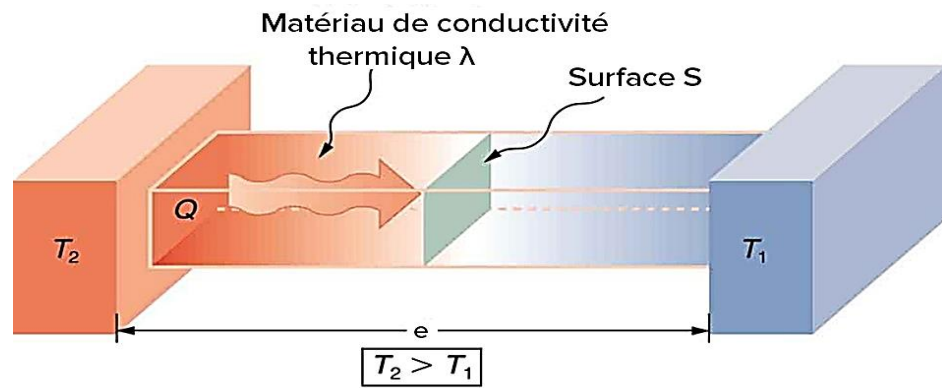


Figure 14 : échange de chaleur par conduction

2.2.2. La convection

La convection se produit lorsque la chaleur est transférée d'un endroit à un autre par le déplacement des fluides.

La convection est régie par la loi de Newton de refroidissement, qui établit une relation entre la chaleur transférée par convection, la différence de température entre le fluide et la surface chauffée et la vitesse du fluide. Cette loi peut être exprimée mathématiquement sous la forme suivante :

$$\Phi = h S (T_s - T_f) \dots \dots \dots (2 - 2)$$

- Φ Flux de chaleur transmis par convection (W)
- h Coefficient de transfert de chaleur ($\text{W.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$)
- S Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)
- T_s Température de surface du solide (la paroi) (k)
- T_f Température du fluide loin de la surface du solide (k)

Il existe 3 types de convection :

- La convection naturelle
- La convection forcée
- La convection mixte

2.2.2.1. La convection naturelle

La convection naturelle est un mode de transfert de chaleur qui se produit en raison de la différence de densité entre les régions chaudes et froides d'un fluide. Tels que les mouvements de l'air chaud qui monte et de l'air froid qui descend.

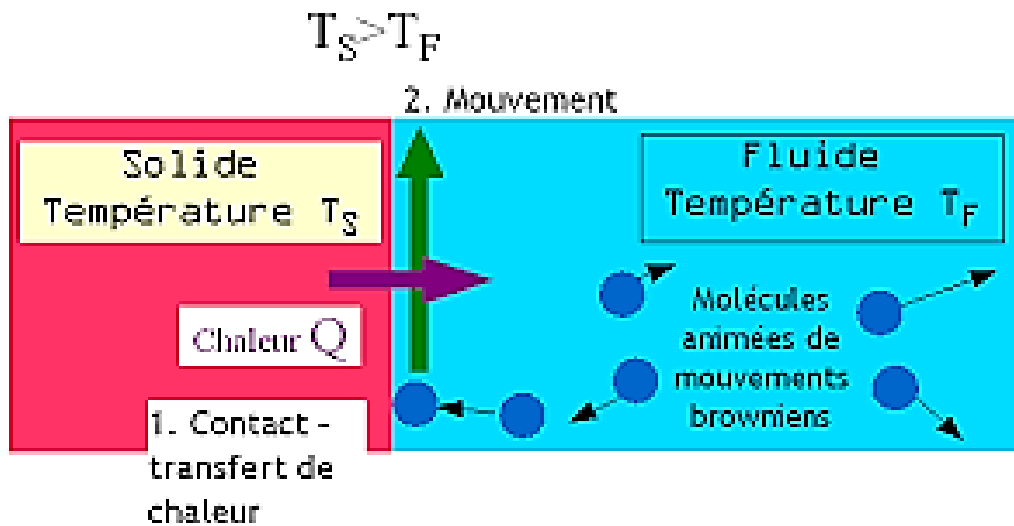


Figure 15 : échange de chaleur par convection naturelle

2.2.2.2. La convection forcée

Est un mode de transfert de chaleur qui se produit lorsque le fluide est forcé de circuler par une source externe, telle qu'une pompe ou un ventilateur.

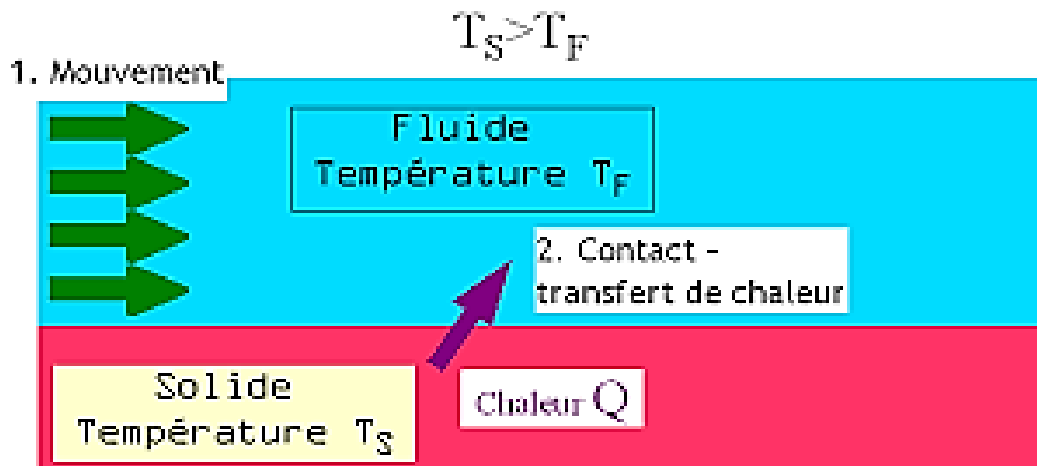


Figure 16 : échange de chaleur par convection forcée

2.2.2.3. La convection mixte

Est un phénomène de transfert de chaleur qui combine les effets de la convection naturelle et de la convection forcée.

Lorsque les effets de la convection forcée et naturelle sont dans le même sens, la convection mixte peut être idéale (favorable) et lorsque ces derniers effets ont un sens opposé, ils sont dits défavorables. [7]

2.2.2.4. Les facteurs liés au transfert de chaleur par convection

- La nature du mouvement :
 - Naturelle
 - Forcée
- Le régime d'écoulement :
 - Si $Re < 2000$ le régime est laminaire
 - Si $2000 < Re < 10^5$ le régime est transitoire
 - Si $2000 < Re < 10^5$ l'écoulement est turbulent
- Les propriétés physiques du fluide :
 - Densité
 - La viscosité
 - La conductivité thermique
 - La capacité thermique
- Les dimensions et la forme :
 - La taille
 - La rugosité
- La température de la surface d'échange thermique.

▪ Des Grandeurs sans dimensions :

❖ Le nombre de Reynolds :

Il est défini comme le rapport de la force d'inertie du fluide sur la force visqueuse, et il est souvent utilisé pour déterminer si un écoulement est laminaire ou turbulent.

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \dots \dots \dots (2 - 3)$$

- ρ la masse volumique (kg.m^{-3})
- D dimension caractéristique de la conduite (diamètre, longueur) (m)
- U la vitesse du fluide (m/s)
- μ la viscosité dynamique ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

❖ Le nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt est défini comme le rapport entre le transfert de chaleur convectif et le transfert de chaleur conductif à travers une surface de contact entre un fluide en mouvement et un solide.

$$Nu = \frac{h D}{\lambda} \dots \dots \dots (2 - 4)$$

- h Coefficient de transfert de chaleur (w.m⁻².k⁻¹)
- D diamètre hydraulique (m)
- λ Conductivité thermique du milieu (w.m⁻¹.k⁻¹)

❖ **Nombre de Prandtl :**

Le nombre de Prandtl est défini comme le rapport entre la diffusivité thermique et la diffusivité cinématique.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \dots \dots \dots (2 - 5)$$

- μ la viscosité dynamique du fluide (kg.m⁻¹.s⁻¹)
- Cp la capacité thermique à pression constante (J. kg⁻¹. k⁻¹)
- λ Conductivité thermique du milieu (w. m⁻¹.k⁻¹)

❖ **Le nombre de Grashof :**

Le nombre de Grashof est défini comme le rapport entre les forces de gravité et les forces visqueuses dans le fluide.

$$Gr = \frac{g \beta \rho^2 D^3 \Delta t}{\mu^2} \dots \dots \dots (2 - 6)$$

- g L'accélération de la gravité (m.s⁻²)
- β le coefficient de dilatation (K⁻¹)
- ρ la masse volumique (kg.m⁻³)
- D la dimension caractéristique du système (m)
- Δt La différence de température [°C].
- μ la viscosité dynamique du fluide (kg.m⁻¹.s⁻¹)

❖ **Le nombre de Rayleigh**

Le nombre de Rayleigh est utilisé pour caractériser la convection et le transfert de chaleur. Il est le rapport entre les forces de flottabilité et les forces visqueuses dans un fluide soumis à des différences de température. Il est calculé en multipliant le nombre de Grashof (qui mesure la force de flottabilité) par le nombre de Prandtl (qui mesure les propriétés visqueuses du fluide).

$$Ra = Pr . Gr = \frac{g \beta \rho^2 D^3 \Delta t}{g \alpha} \dots \dots \dots (2 - 7)$$

- La viscosité cinématique (m².s⁻¹) ;

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \dots \dots \dots (2 - 8)$$

- La diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$) ;

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \dots \dots \dots (2 - 9)$$

2.2.3. Le rayonnement

Le rayonnement thermique est l'énergie émise par la matière à une température non nulle. Cela peut être attribué à des changements dans les configurations électroniques des atomes ou molécules constituants. L'énergie du champ de rayonnement est transportée par des ondes électromagnétiques (ou alternativement, des photons). Le transfert de rayonnement se produit le plus efficacement dans le vide, et la vitesse à laquelle l'énergie est libérée par unité de surface (W/m^2) est appelée la puissance émissive de surface E. Il existe une limite supérieure à la puissance émissive, qui est prescrite par le Loi de Stefan–Boltzmann. [7]

$$\Phi = \sigma S T_s^4 \dots \dots \dots (2 - 10)$$

- Φ Flux thermique (W)
- σ Constante de Stéphan Boltzmann $5.67.10^{-8}$ ($W.m^{-2}.K^{-4}$)
- S Aire de la surface (m^2)
- T_s Température de la surface (K)

Le flux maximum est obtenu pour une surface idéale (corps noir). Cependant, les surfaces réelles (corps gris) ont une certaine émissivité (ϵ) qui vient réduire le flux émis par la surface. [8]

$$\Phi = \epsilon \sigma S T_s^4 \dots \dots \dots (2 - 11)$$

- ϵ Facteur d'émission de la surface.

Dans le cas où cette surface est environnée d'une autre surface à une température T_{ENVIR} , l'échange net de chaleur est alors. [8]

$$\Phi = \epsilon \sigma S (T_s^4 - T_{ENVIR}^4) \dots \dots \dots (2 - 12)$$

2.3. Conclusion

Après avoir étudié les différents types de transfert de chaleur et connaître leurs effets et les exprimer en équations mathématiques, cette dernière nous permettra de modéliser ce qui se passe dans les procédés de soudage du côté thermique sous forme d'équations afin de les analyser mathématiquement et extraire des résultats numériques et c'est ce dont nous parlerons dans le chapitre suivant.



Chapitre 3 Modélisation mathématique

3.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons donné une étude bibliographique sur la modélisation de soudage par électrofusion. Après on a décrit notre phénomène physique sous forme d'équations mathématiques différentielles.

3.2. Bibliographie sur les modèles numériques de soudage

Plusieurs modèles numériques de procédés de soudage ont été utilisés pour évaluer les distributions de température et de contrainte au sein d'une pièce soudée. La plupart d'entre eux sont des modèles éléments finis bidimensionnels. Les paramètres calculés par ces modèles numériques sont classiquement : la température, la pression, le volume de la zone fondue, la surface de la zone ayant bien soudée et les contraintes résiduelles. [14]

Dans ce paragraphe, nous allons passer en revue les principaux modèles numériques de soudage publiés à ce jour dans la littérature ainsi que les principaux phénomènes physiques qui y ont été modélisés. Bowman [15] a réalisé ce travail il y a déjà quelques années spécifiquement sur le soudage par électrofusion. Nous avons pu constater que depuis, peu de nouveaux travaux ont été publiés sur ce sujet. On peut classer les différents modèles en plusieurs catégories, notamment en fonction de la dimension du modèle éléments finis (1, 2 ou 3 dimensions) et du nombre de phénomènes physiques modélisés dans le procédé.

Les études autour de la simulation du soudage par électrofusion ont commencé dans les années 80 avec Pitman [16]. L'évolution de la température au sein des pièces soudées constitue le point central de son étude. Elle est déterminée à l'aide d'un modèle de transfert de chaleur à une dimension (1D). La thermodépendance des paramètres de la matière est prise en considération. Les principales hypothèses dont il a fait le postulat sont :

- La largeur de la zone couverte par le fil chauffant est très grande par rapport à l'épaisseur du tube et de l'accessoire. C'est ce qui lui a permis de se placer dans une configuration unidimensionnelle.
- La présence de l'espacement entre l'accessoire et le tube n'a pas d'influence sur l'évolution de la température. Le contact est donc considéré parfait.
- L'énergie délivrée par le fil chauffant est homogène le long du fil.

Ce modèle détermine la distribution de la température dans la direction axiale et néglige le gradient thermique dans les autres directions. La résistance thermique entre les différent corps n'est pas prise en compte, ni l'aspect mécanique (dilatation de la matière, loi de comportement mécanique...). La comparaison avec les mesures expérimentales n'a pas permis de valider le

modèle numérique. Il permet tout de même d'avoir un ordre de grandeur de la température maximale qu'on peut atteindre à l'interface entre l'accessoire et le tube et au niveau des surfaces externes.

En s'inspirant de ce modèle, Dufour et Meister [17] ont ajouté les effets de la chaleur latente dans l'équation de la chaleur. Ceci a permis d'obtenir un calcul plus précis de la température au cours du refroidissement.

O'Donoghue et al [18], et Kanninen et al [19], ont construit un modèle de soudage thermo-mécanique à 2 dimensions en utilisant le logiciel commercial ABAQUS. Leur modèle thermo-mécanique prend en compte les chaleurs latentes et la dépendance des propriétés thermiques du matériau par rapport à la température. Le PE est considéré comme élastique avec un module d'Young et un coefficient de Poisson dépendants de la température. Ce modèle a permis d'étudier l'influence de l'espacement entre l'accessoire et le tube, sans pour autant être validé avec des mesures expérimentales.

Nakashiba et al [20], et Nishimura et al [21], ont développé un modèle à deux dimensions avec le logiciel éléments finis CASTEM. Ce modèle a permis d'étudier l'influence de la tension appliquée, du temps de chauffage et de la température ambiante sur l'évolution de la température au sein des pièces. Les résultats de l'étude semblent être en bonne adéquation avec les données expérimentales fournies. Cependant, la comparaison n'a pu être réalisée qu'au centre de l'interface entre le tube et l'accessoire. Les hypothèses choisies ne permettent pas en effet de valider l'évolution de la température tout au long de l'interface.

Le modèle de Rosala et al [22], semble finalement être le plus complet. Il a été développé à l'aide du logiciel commercial de simulation ABAQUS. L'objectif était d'étudier l'influence de l'espacement qu'il peut y avoir entre le tube et l'accessoire (Figure 3-1). L'accessoire et le tube sont initialement séparés et grâce à la dilatation de la matière ils entrent en contact l'un avec l'autre au cours du soudage. Il prend en compte les deux aspects, thermique et mécanique du soudage.

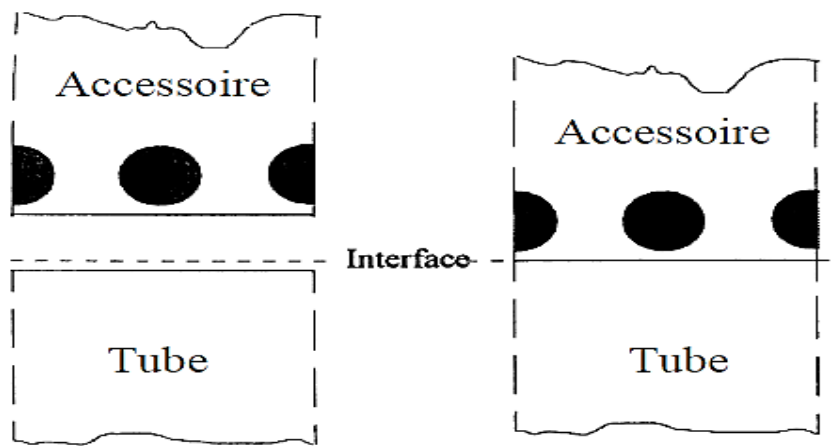


Figure 17 : Présentation du modèle de Rosala et al. [22]

Les principales hypothèses faites pour calculer le déplacement de la matière lié au soudage et la distribution de la température sont les suivantes :

- Le modèle est 2D axisymétrique ;
- Le fil chauffant est considéré fixe.
- La conductivité, la densité et la chaleur spécifique du polymère dépendent de l'évolution de la température au cours du soudage ;
- Les enthalpies de fusion et de cristallisation sont considérées indépendantes de la vitesse de chauffage ou de cristallisation ;
- Le polyéthylène suit une loi d'écrouissage élasto-plastique. Le module d'Young et la limite élastique sont considérés comme dépendants de la température dans la phase solide et indépendants de celle-ci dans la phase fondue (Tableau 3).
- Pour contourner des problèmes de divergences, les auteurs ont choisi de prendre comme coefficient de dilatation du fil chauffant, celui du PE. Il s'agit d'une hypothèse extrêmement forte.

Tableau 3 : Paramètres de la loi de comportement utilisé par Rosala

	25 °C	110 °C	350 °C
Module d'Young	362 MPa	34 MPa	34 MPa
Limite élastique	14 MPa	2,3 MPa	2,3 MPa
Coefficient de Poisson	0,45	0,45	0,45

Ce modèle a permis d'étudier l'influence de l'espacement entre l'accessoire et le tube sur l'évolution de la température à l'interface. Les résultats présentés confirment, comme on pouvait s'en douter, que l'espacement influe grandement sur l'évolution de la température dans la première partie du chauffage (pour des températures inférieures à 75 °C). Une fois la matière suffisamment dilatée, le contact entre les deux corps devient parfait, et l'espacement initial n'intervient plus sur l'évolution de la température.

Fujikake et al [23], ont effectué une simulation similaire pour étudier l'évolution de l'espacement en fonction du temps au cours du chauffage. Le comportement du PE est supposé élastique avec un module d'Young dépendant de la température. Ce modèle thermo-mécanique a permis de calculer l'évolution de la pression et de la température à l'interface en fonction du temps au cours du chauffage. La comparaison des résultats avec l'expérience montre que l'étude reste qualitative, l'accord entre expérience et simulation n'étant qu'approximatif.

Comme un dernier modèle que l'on présente, CHEBBOU en 2013 [2] a fait la simulation du procédé du soudage par électrocuton en 3D à l'aide du logiciel de la simulation forge. Il a choisi la méthode des éléments finis. Il a introduit des hypothèses thermiques et mécaniques.

Il a pris en compte :

- Deux résistances de contact : entre le fil et l'accessoire et entre l'accessoire et le tube
- Température ambiante de 23 °C
- Le coefficient d'échange thermique avec l'air ($17 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$)
- Une condition de symétrie dans le cas du manchon
- Un couplage thermomécanique.
- Une étude rhéologique.
- La conductivité, la densité et la chaleur spécifique du polymère ne dépendent pas de l'évolution de la température au cours du soudage.
- Les enthalpies de fusion et de cristallisation sont considérées dépendantes de la vitesse de chauffage ou de cristallisation.
- Le polyéthylène suit une loi d'érouissage élasto-plastique.

Nous prenons le modèle de CHEBBOU comme référence [2], avec les mêmes dimensions et conditions aux limites pour notre étude.

3.3. Modélisation de l'électrofusion

3.3.1. Modèle physique

Pendant le processus de soudage par électrofusion, les matériaux se trouvent à la fois à l'état solide et à l'état fondu en raison de leur faible conductivité thermique. Chaque état présente des propriétés thermiques et mécaniques distinctes. Entre les deux états, une zone de transition solide/fondu se forme, où le matériau présente un comportement hybride. Afin de mieux caractériser l'évolution de l'état de la matière tout au long du processus, il est essentiel de prendre en compte les cinétiques de fusion et de cristallisation du PE (polyéthylène).

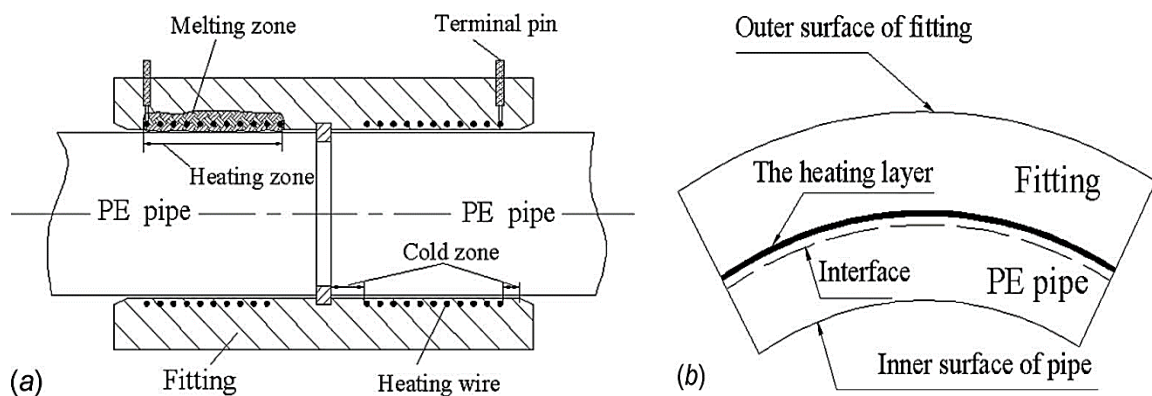


Figure 18 : Représentation schématique d'un manchon électrosoudable. [13]

3.3.2. Modèle mathématique

Les matériaux utilisés dans le soudage par électrofusion sont considérés comme un milieu continu et supposés homogènes du point de vue mécanique. Par conséquent, les principes fondamentaux de la mécanique des milieux continus peuvent être appliqués pour analyser ces matériaux. L'équation qui régit le problème mécanique est celle de la conservation de la quantité de mouvement et peut être formulée de la manière suivante :

$$\nabla \cdot \sigma + \rho g = \rho \gamma \dots \dots \dots (3 - 1)$$

Avec :

- σ Le tenseur de la contrainte
- ρ La masse volumique
- g L'accélération de la pesanteur
- γ L'accélération

La partie thermique est gouvernée par l'équation de la chaleur qui permet de connaître la température en tout point du matériau et à chaque instant :

$$\rho(T) c_p(T) \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot q + \dot{w} \dots \dots \dots (3 - 2)$$

Où :

- ρ la masse volumique
- C_p la capacité calorifique
- T la température
- \dot{W} la source interne de la chaleur due a deux phénomènes : la conversion partielle de la puissance mécanique en énergie thermique et l'enthalpie de fusion ou de cristallisation H :

$$\dot{W} = \sigma : \dot{\epsilon} + H \dots \dots \dots (3 - 3)$$

On suppose que le matériau suit la loi de conduction de Fourier, c'est-à-dire que le flux de chaleur est une fonction linéaire du gradient thermique :

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \dots \dots \dots (3 - 4)$$

- λ est la conductivité thermique.

Puisque le terme source est associé à la cinétique de fusion, il faut d'abord discuter du mécanisme qui influence le terme source.

3.3.2.1. Cinétique de fusion

La cinétique de fusion, également connue sous le nom de cinétique de changement de phase solide-liquide, est un processus étudié dans de nombreux domaines scientifiques, tels que la physique des polymères et la chimie des matériaux. Plusieurs références mentionnées fournissent des informations pertinentes sur la cinétique de fusion et la détermination des lois qui la régissent.

Les travaux d'Avrami, ont jeté les bases de la compréhension de la cinétique de phase change. Il a proposé une théorie générale qui décrit la transformation d'un matériau d'un état solide à un état liquide. La première publication d'Avrami présentait une théorie générale de la cinétique des changements de phase, basée sur des principes thermodynamiques. Il a introduit l'équation cinétique d'Avrami, également connue sous le nom d'équation d'Avrami-Erofeev, pour décrire la transformation en fonction du temps. [9], [10] et [11]

L'équation d'Avrami est couramment utilisée pour déterminer la cinétique de fusion ou de cristallisation de différents matériaux. Cette équation relie la fraction transformée d'un matériau à

la température et au temps de traitement. Elle est basée sur l'hypothèse que la transformation se produit par la formation de noyaux de phase nouvellement formée qui croissent avec le temps. L'équation d'Avrami est de la forme :

$$\alpha_L(t) = 1 - \exp[-K_{A\text{fusion}}(T).t^n] \dots \dots \dots (3 - 5)$$

Où

- α_L la fraction transformée
- $K_{A\text{fusion}}$ la constante de vitesse
- t le temps (s)
- n paramètre qui dépend de la nature de la transformation et de la dimensionnalité du matériau.

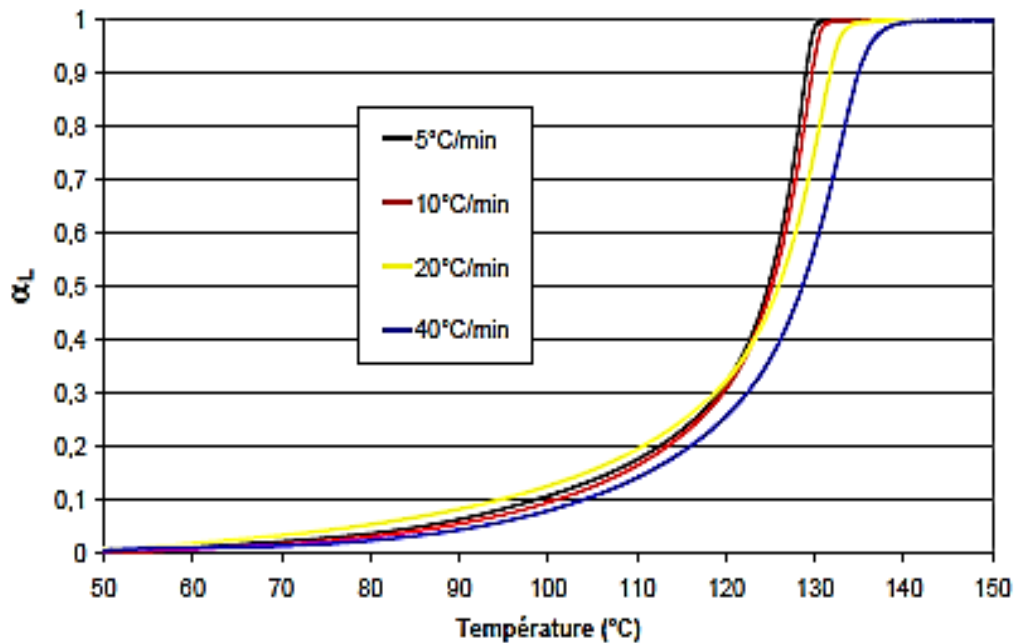


Figure 19 : Evolution du taux de transformation lors de la fusion, α_f , en fonction de la température à différentes vitesses de chauffage

Les travaux de Ozawa sur la cinétique de cristallisation non-isotherme des polymères permis de développer des méthodes expérimentales pour déterminer les paramètres cinétiques, tels que la constante de vitesse, à partir de courbes de refroidissement non-isothermes. [12]

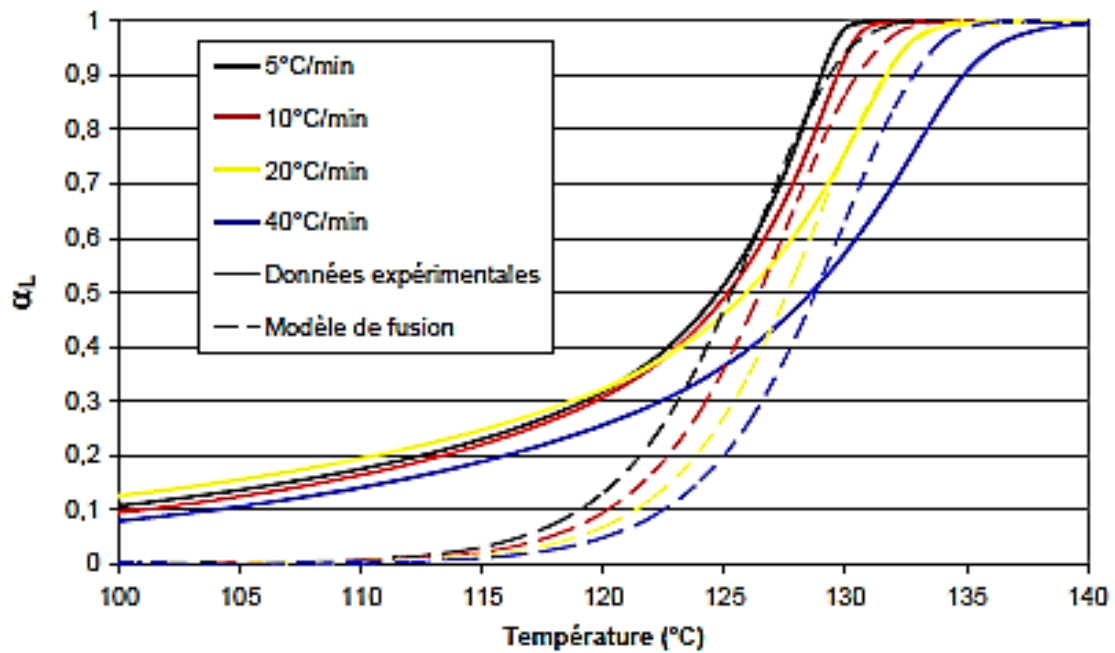


Figure 20 : Evolution du taux de transformation α_L en fonction de la température à différentes vitesses de chauffage. Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs du modèle de fusion

L'enthalpie de fusion joue un rôle crucial dans la cinétique de fusion, qui représente la vitesse à laquelle un matériau passe de l'état solide à l'état liquide lorsqu'il est chauffé. L'enthalpie de fusion est un paramètre clé qui influe sur la vitesse à laquelle la fusion se produit et affecte également le refroidissement du matériau après la fusion.

$$H = \rho \Delta H_f \frac{\partial \alpha_L}{\partial t} \dots \dots \dots (3 - 6)$$

3.4. Les hypothèses

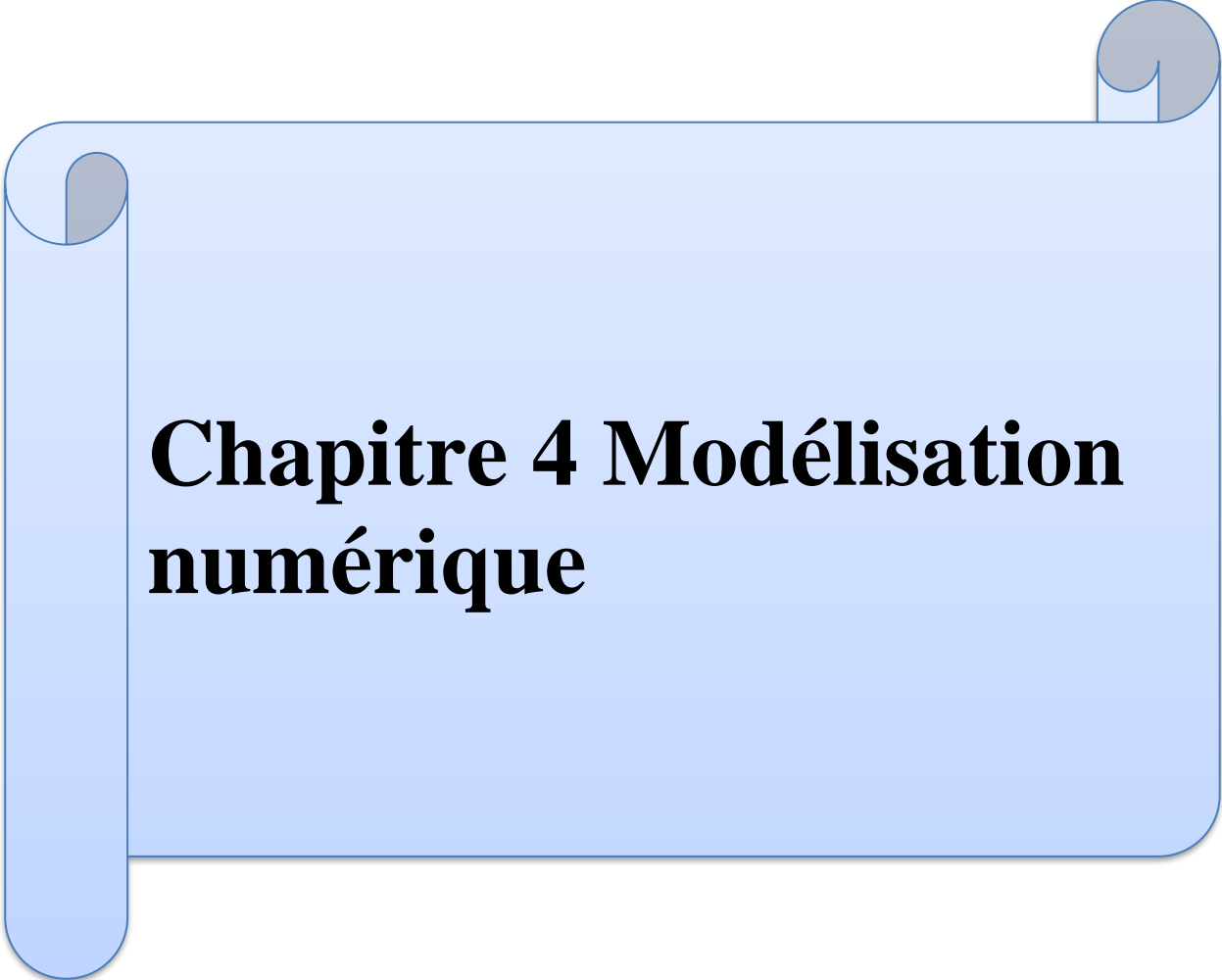
Notre étude est soumise à des équations gouvernantes qui décrivent le phénomène étudié. Pour résoudre ces équations, nous posons un ensemble d'hypothèses représentées dans ce qui suit :

- Le modèle est bidimensionnel (2D).
- Le régime est transitoire.
- On a remplacé le matériau de cuivre qui représente le fil chauffant (résistance) par un flux de chaleur.

- On néglige l'aspect mécanique de l'étude, qui représente le déplacement de la matière et la puissance mécanique qui converge en énergie thermique, donc pas de couplage thermomécanique.
- On ne prend pas en considération le terme source volumique.
- La conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique du polymère ne dépendent pas de l'évolution de la température au cours du soudage.
- On prend en considération le calcul de l'évolution de température dans le polymère sauf au cours du chauffage (on n'en intéresse pas à la partie de refroidissement).
- Dans notre étude on ne va pas inclure l'étude rhéologique.

3.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit le processus de soudage par électrofusion en le modélisant avec des équations mathématiques. Nous avons également mis des hypothèses afin de déterminer les conditions de l'étude et de faciliter les simulations numériques, dont nous discuterons dans le prochain chapitre.



Chapitre 4 Modélisation numérique

4.1. Introduction

La résolution des équations se fait par les utilisations d'une méthode numérique qui fait intervenir le concept de discrétisation.

Dans ce chapitre nous allons présenter le logiciel utilisé pour effectuer la simulation outre le principe et la méthode de fonctionnement. Ensuite, ce modèle mathématique est simplifié par un modèle numérique qui nous permet de savoir comment calculer les températures dans des zones spécifiques pendant le processus de soudage par électrofusion. Finalement nous présentons les conditions et la géométrie du modèle pour faire la simulation.

4.2. Description du logiciel

Le logiciel Fluent, également connu sous le nom d'ANSYS Fluent, est un logiciel de simulation numérique de tous les écoulements de fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques, la cavitation, les écoulements dans les moteurs thermiques et les machines tournantes, et ce, pour des géométries industrielles complexes. Ce produit dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation.

4.2.1. Principe de fonctionnement

Le logiciel Fluent utilise une approche numérique pour résoudre les équations fondamentales qui régissent le comportement des fluides et des phénomènes de transfert de chaleur. Il divise le domaine d'étude en maillages (ou grilles) constitués de petits volumes de contrôle. Les équations mathématiques sont discrétisées et résolues numériquement sur chaque volume de contrôle, en prenant en compte les propriétés physiques des fluides, les conditions aux limites et les conditions initiales spécifiées par l'utilisateur. Le logiciel de calcul FLUENT comprend :

- **Le solveur** : le menu est tel que les opérations se font de gauche vers la droite.
 - Importer les dimensions du maillage.
 - Sélectionner le modèle physique.
 - Définir les propriétés des matériaux
 - Définir les conditions de calcul.
 - Définir les conditions aux limites.
 - Régler les paramètres du solveur.
 - Régler le moniteur de convergence.
 - Fournir une solution initiale.
 - Lancer le calcul et surveiller la solution

➤ La procédure de calcul est résumée selon l'organigramme suivant :

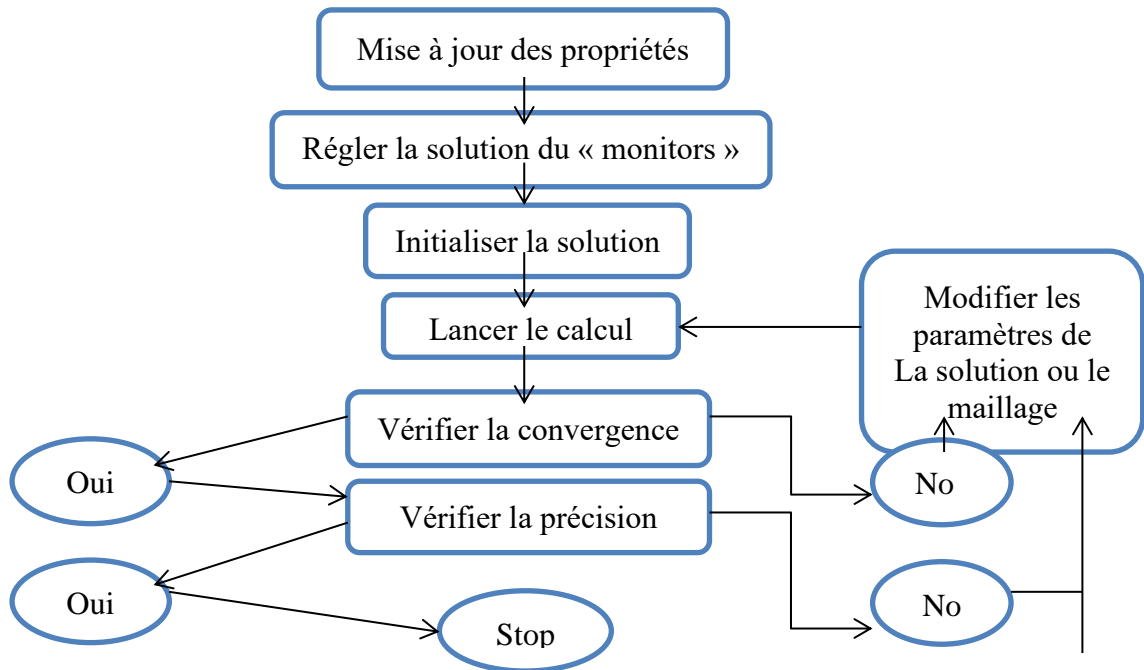


Figure 21 : Organigramme de calcul numérique.

4.2.2. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une approche de discrétisation permettant de convertir les équations de conservation aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques pouvant être résolues numériquement. Elle repose sur l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle afin d'obtenir des équations discrètes qui préservent les grandeurs physiques à l'échelle de chaque volume de contrôle. Elle consiste à diviser le domaine en un ensemble de volumes finis (aussi appelés cellules, éléments ou mailles) et à discrétiser les équations sur ces volumes pour obtenir une solution numérique.

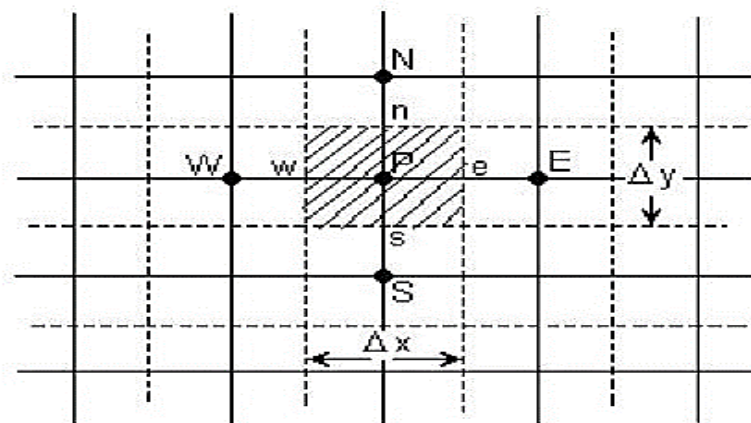


Figure 22 : Volume de contrôle bidimensionnel

4.3. Discrétisation par la méthode des volumes finis

A partir des hypothèses précédentes l'équation de la chaleur s'exprime par la formule suivante :

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T \dots \dots \dots (4 - 1)$$

Donc :

L'équation générale bidimensionnelle dans la phase transitoire s'exprime par la formule suivante :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (4 - 2)$$

On considère le volume de contrôle présenté si dessus, l'intégration de l'équation sur le volume de contrôle et sur un intervalle de temps de (t) au (t + Δt) donne :

$$\int_{v_c} \int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{v_c} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{v_c} \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV dt \dots \dots \dots (4 - 3)$$

La formule peut être écrite sous la forme suivante :

$$\int_{v_c} \left(\int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) dV = \int_t^{t+\Delta t} \left(\lambda_e \Delta y \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \lambda_w \Delta y \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \left(\lambda_n \Delta x \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \lambda_s \Delta x \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right) dt \dots \dots \dots (4 - 4)$$

On intègre la partie gauche par rapport au temps et on peut la réécrire ainsi :

$$\int_{v_c} \left(\int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) dV = \rho c_p (T_P - T_P^0) \Delta V \dots \dots \dots (4 - 5)$$

Où :

- T_P^0 est la température à l'instant (t)
- T_P est la température à l'instant (t+ dt)

Remplaçant le gradient de température par le schéma centré :

$$\rho c_p (T_P - T_P^0) \Delta x \Delta y = \int_t^{t+\Delta t} \left(\lambda_e \Delta y \left(\frac{T_E - T_P}{\delta x} \right) + \lambda_w \Delta y \left(\frac{T_P - T_W}{\delta x} \right) \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \left(\lambda_n \Delta x \left(\frac{T_N - T_P}{\delta y} \right) - \lambda_s \Delta x \left(\frac{T_P - T_S}{\delta y} \right) \right) dt \dots \dots \dots (4 - 6)$$

Maintenant, pour calculer la partie droite de l'équation il faut connaître la variation des températures de point P et des points voisins S, N, W, E. Pour cela de nombreuses solutions s'apparaissent, on peut prendre la Température à l'instant (t), à l'instant (t+dt), ou une combinaison des deux solutions précédentes. La forme générale de l'intégration temporelle s'écrit :

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p dt = \begin{cases} T_p^0 \Delta t \\ T_p \Delta t \\ (fT_p + (1-f)T_p^0) \Delta t \end{cases}$$

Où f est un facteur de pondération compris entre $0 \leq f \leq 1$

En appliquant la forme générale de l'intégration temporelle aux points T_P, T_E, T_W, T_S, T_N on obtient :

$$\begin{aligned} \rho c_p (T_p - T_p^0) \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} = & f \left[\left(\lambda_e \Delta y \left(\frac{T_E - T_P}{\delta x_e} \right) - \lambda_w \Delta y \left(\frac{T_P - T_W}{\delta x_w} \right) \right) \right. \\ & \left. + \left(\lambda_n \Delta x \left(\frac{T_N - T_P}{\delta y_n} \right) - \lambda_s \Delta x \left(\frac{T_P - T_S}{\delta y_s} \right) \right) \right] \\ & + (1-f) \left[\left(\lambda_e \Delta y \left(\frac{T_E^0 - T_P^0}{\delta x_e} \right) - \lambda_w \Delta y \left(\frac{T_P^0 - T_W^0}{\delta x_w} \right) \right) \right. \\ & \left. + \left(\lambda_n \Delta x \left(\frac{T_N^0 - T_P^0}{\delta y_n} \right) - \lambda_s \Delta x \left(\frac{T_P^0 - T_S^0}{\delta y_s} \right) \right) \right] \dots \dots \dots (4-7) \end{aligned}$$

En regroupant les termes pour chaque point, on peut se permettre d'écrire donc :

$$\begin{aligned} a_p T_P = & a_w [f T_W + (1-f) T_W^0] + a_E [f T_E + (1-f) T_E^0] \\ & + a_S [f T_S + (1-f) T_S^0] + a_N [f T_N + (1-f) T_N^0] \\ & + [a_p^0 - (1-f) a_w - (1-f) a_E - (1-f) a_N] \\ & + [-(1-f) a_S] T_P^0 \dots \dots \dots (4-8) \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{cases} a_w = \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} \\ a_E = \frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} \end{cases} \quad \begin{cases} a_S = \frac{\lambda_s A_s}{\delta y_s} \\ a_N = \frac{\lambda_n A_n}{\delta y_n} \end{cases} \quad \begin{cases} A_w = A_e = \Delta y \\ A_s = A_n = \Delta x \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_p = f(a_w + a_E + a_S + a_N) + a_p^0 \\ a_p^0 = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \end{cases}$$

La forme exacte de l'équation discrétisée dépend de la valeur de f et on distingue 3 cas :

- Lorsque [f=0] on parlera donc du schéma explicite, dans ce dernier on utilise les températures à l'instant (t) ;
- Lorsque [f=1] on est donc dans le schéma totalement implicite, dans ce cas on utilise les températures à l'instant (t+dt) ;
- Lorsque [0<f<1] on utilise les températures aux deux instants (t) et (t+dt), et si [f=1/2] on fait donc appel au schéma de Cranck Nicelson ou bien semi-implicite.

Remplaçant f par sa valeur dans ce cas (f=1), l'équation de discrétisation est la suivante :

$$a_p T_P = a_w T_W + a_E T_E + a_S T_S + a_N T_N + a_p^0 T_P^0 \dots \dots \dots (4-9)$$

4.4. Les conditions aux limites

- Paroi gauche : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0$ (4 - 10)
- Paroi droite : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0$ (4 - 11)
- Paroi supérieure : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = h(Ta - Tp)$ (4 - 12)
- Paroi inférieure : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = h(Tp - Ta)$ (4 - 13)

Avec :

- Tp : température de PEHD
- Ta : température ambiante
- Au niveau du fil chauffant parcouru par un courant électrique délivrant une puissance électrique, on impose une densité de flux de chaleur :

$$-\lambda \cdot \nabla \cdot T = \Phi \dots \dots \dots (4 - 14)$$

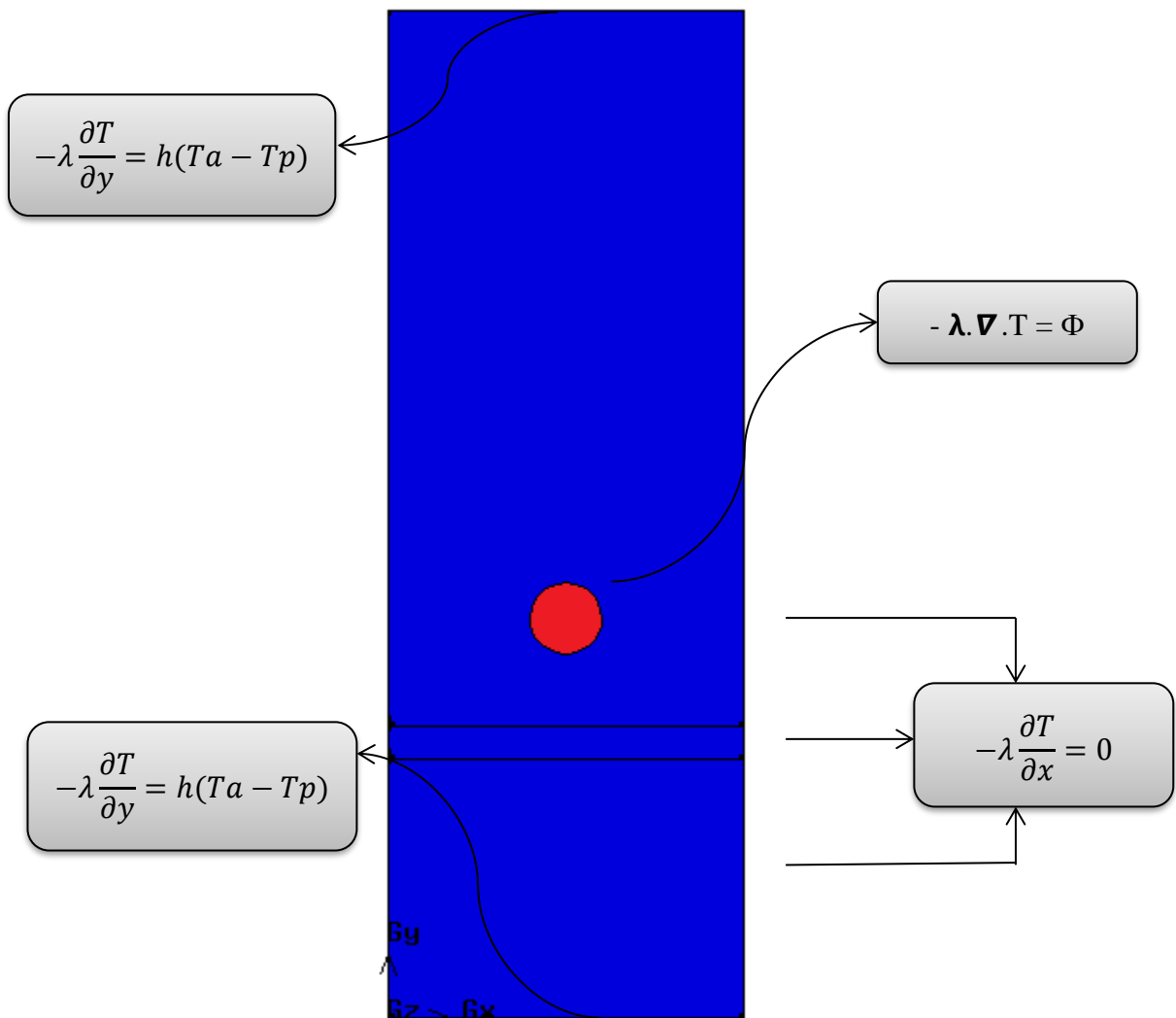


Figure 23 : Les conditions aux limites

Le logiciel fluent utiliser la densité du flux pour les calculs, mais nous avons des valeurs de la puissance électrique. Donc nous allons convertir les valeurs de puissance électrique en densité du flux de chaleur.

La puissance électrique est donnée par :

$$P = U \cdot I \dots \dots \dots (4 - 15)$$

Avec :

- P la puissance électrique (W)
- U la tension électrique (V)
- I le courant électrique (A)

Donc la densité de flux est donnée par :

$$\Phi = \frac{P}{\pi.D.Lf} \dots \dots \dots (4 - 16)$$

Où :

- Lf Longueur de fil (géométrie bidimensionnelle Lf=1).

4.5. Application des conditions aux limites

Les conditions aux limites et les coefficients d'échange entre les différents corps ont été pris identiques à ceux utilisés dans la simulation de CHEBBOU :

- Température ambiante 23 °C
- Le coefficient d'échange thermique avec l'air (17 W.m⁻¹.K⁻¹)

Dans les procédés de soudage par électro fusion, la valeur de la densité du flux qui remplace le fil chauffant est généralement variable en fonction des dimensions de la géométrie et du type de machine utilisée, et sa valeur est généralement donnée par le fabricant. Dans notre étude, nous avons utilisé un flux constant et pris une valeur de 166 watts comme valeur de référence à partir des simulations de CHEBBOU.

4.6. Les données des matériaux utilisés

Dans cette simulation nous avons utilisation deux matériaux, le PEHD et l'air. Voici quelques propriétés thermo-physiques :

Tableau 4 : Propriétés thermo-physique

	Masse volumique (Kg/m ³)	Chaleur massique (J/Kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)
PEHD	959.5	2600	0.4
L'air	1.225	1006.43	0.0242

4.7. Géométrie de modèle

Les dimensions géométriques du modèle utilisé pour réaliser le soudage par électrofusion entre le manchon électrosoudable et le tube sont :

- L'épaisseur du manchon est de 5 mm
- L'épaisseur du tube est de 1.8 mm
- L'espacement entre le manchon et le tube est 0.24 mm
- Le diamètre de fil chauffant est 0,5 mm
- L'espacement entre les fils est 2 mm
- La distance qui sépare le fil chauffant de l'interface est de 0,5 mm

2.5mm

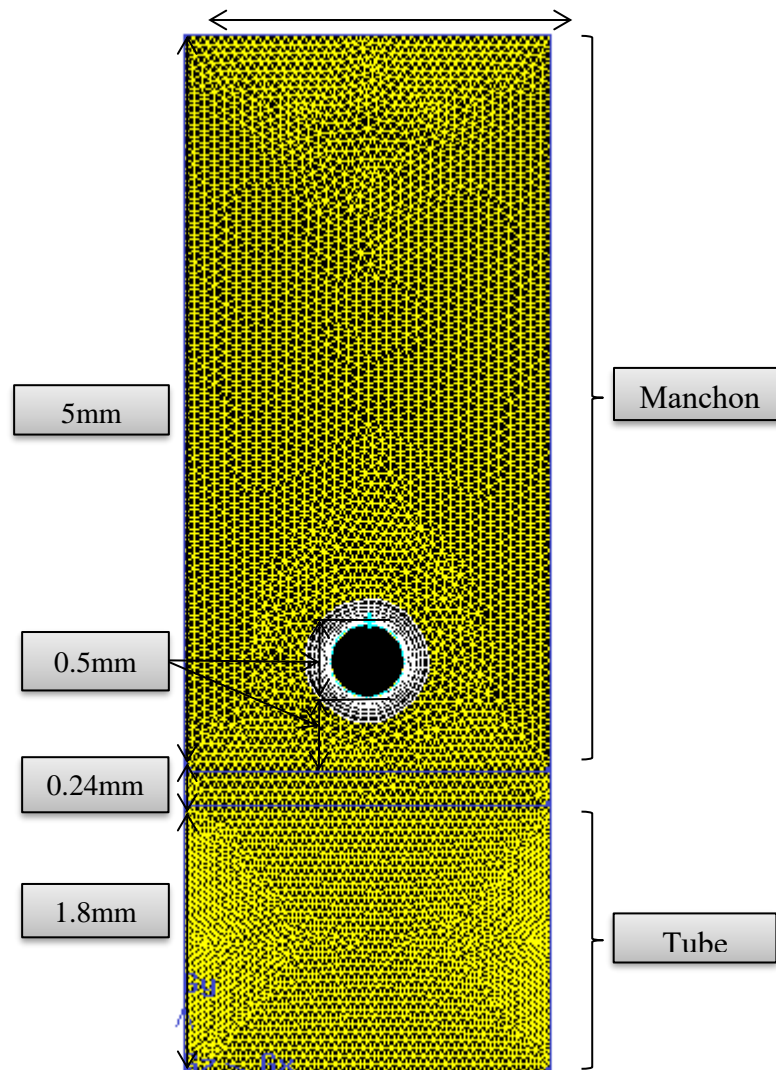


Figure 24 : Géométrie de modèle

4.8. Le maillage

Le maillage utilisé pour discrétiser le domaine de l'étude est de forme triangulaire. Nous l'avons créé à l'aide du logiciel Gambit.

4.9. Conclusion

Dans ce chapitre on a transformé l'équation différentielle gouvernante de transfert thermique qui est obtenue dans le chapitre précédent par sa transformation de la forme différentielle à la forme algébrique en utilisant la méthode des volumes finis qui est utilisé par le logiciel de simulation afin d'obtenir les résultats du processus de soudage par électrofusion.



Chapitre 5 Résultats et discussion

5.1. Introduction

La simulation ne peut pas présenter des résultats réalisables admises sans avoir les valider par d'autres résultats obtenus par l'étude bibliographique. Les paramètres visent à comparer sont essentiellement qui influent fortement sur la qualité de la soudure.

5.2. Résultats et discussion

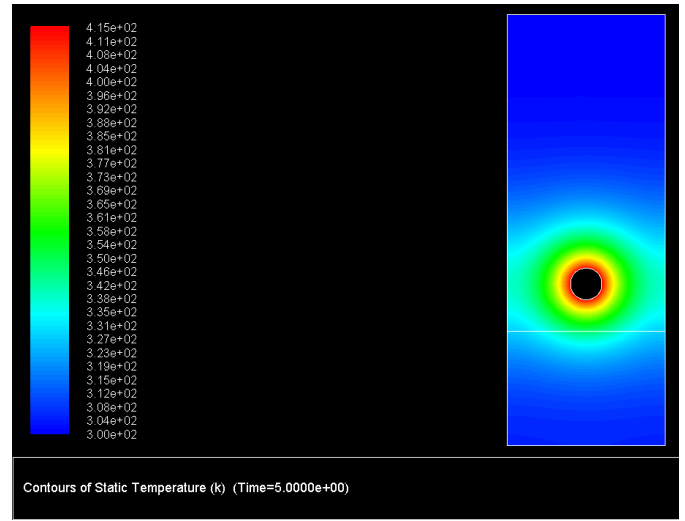
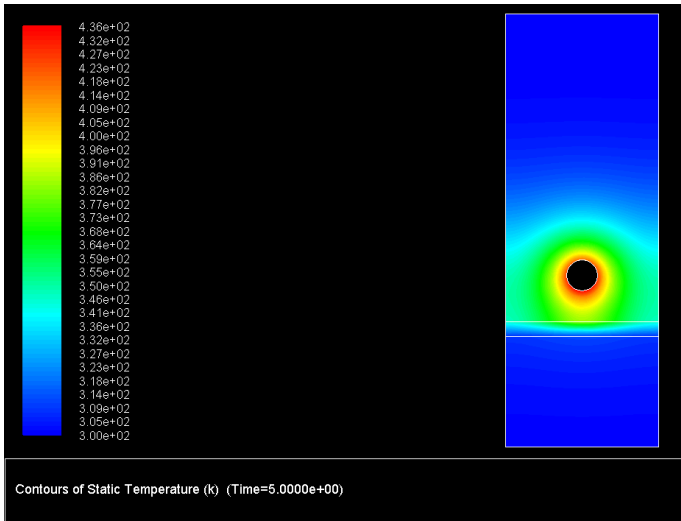
5.2.1. Confrontation numérique

Bien que la simulation ait une efficacité énorme, on ne pas en utiliser toute seule pour valider et admettre les résultats dont on atteigne, on a besoin d'autres résultats numériques ou expérimentales pour comparer notre résultat.

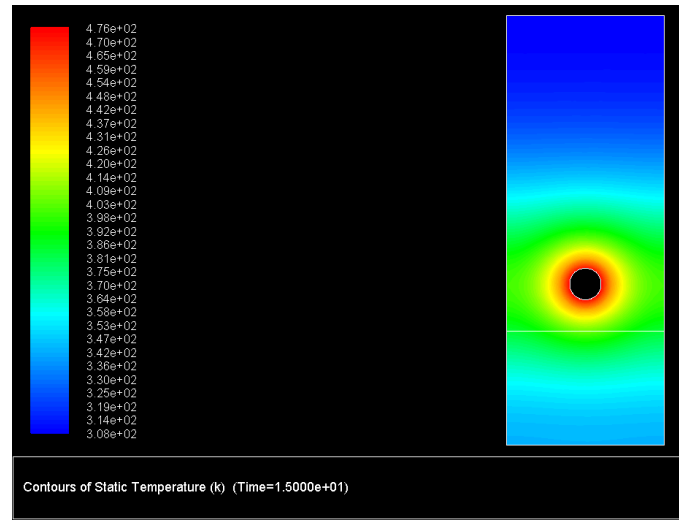
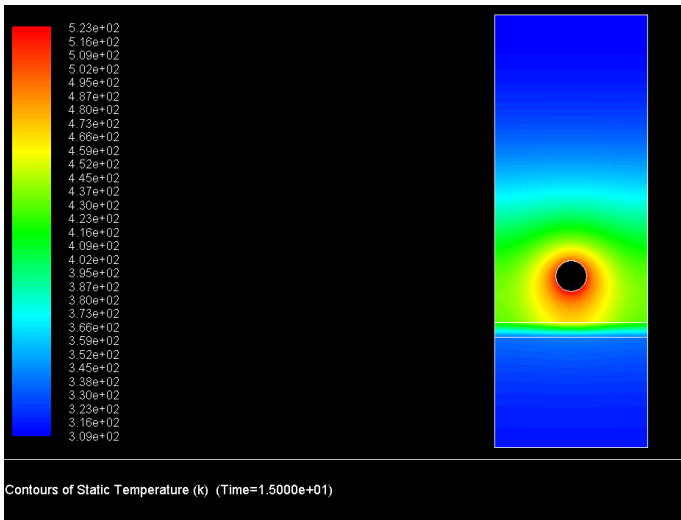
Le travail de simulation déroule 25s d'échauffement sous une puissance de 166w, les champs de température, est présenter dans les figures suivantes :

Cas avec espacement

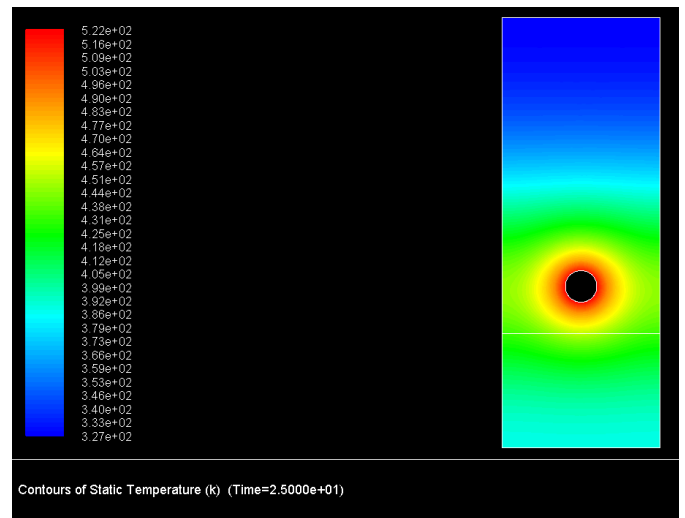
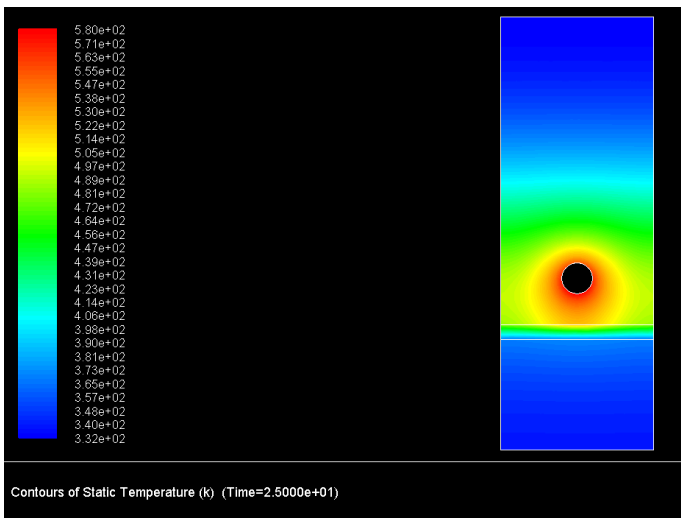
Cas sans espacement



5s



15s



25s (fin de chauffage)

Figure 25 : distribution de la température à différents instants avec et sans espacement

Chapitre 5 Résultats et discussion

Les courbes suivantes résument les résultats de simulation, en comparaison avec les résultats Numériques obtenues de travail de ziad chebbo [2] :

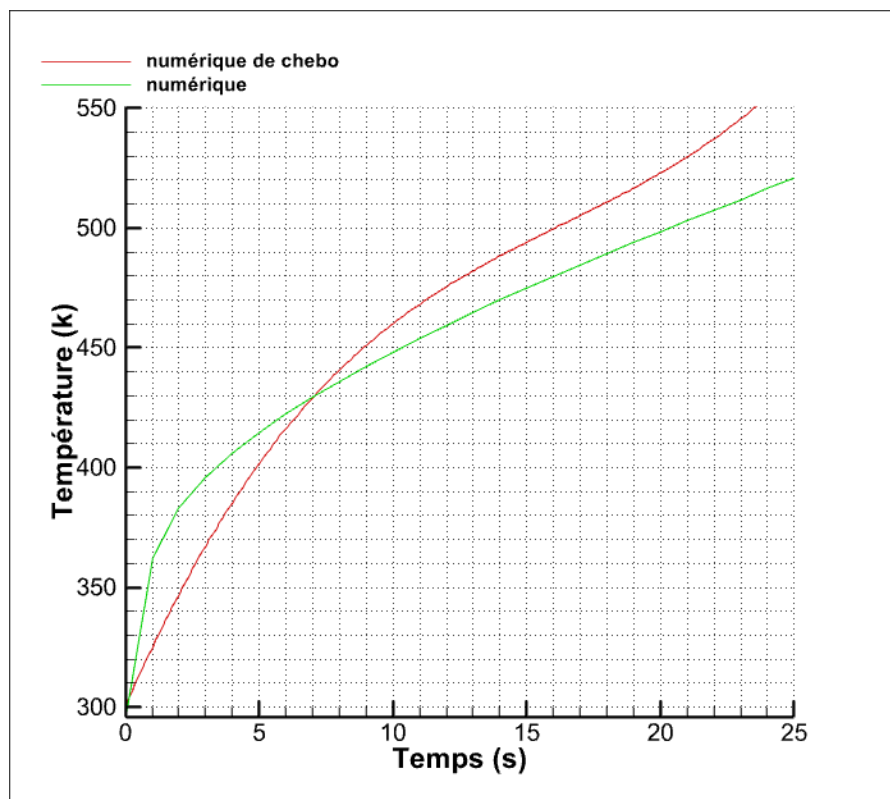


Figure 26 : distribution de température côté fil

Au début des premières seconde de la phase de chauffage, notre température était élevée par rapport les températures de chebbo, et cela est due à résistance de contact qu'on a négligé, ensuite les rôles se sont inversés, les températures ont légèrement baissé par rapport à celle de chebbo, à cause de présence de la fusion jusqu'à la fin de chauffage.

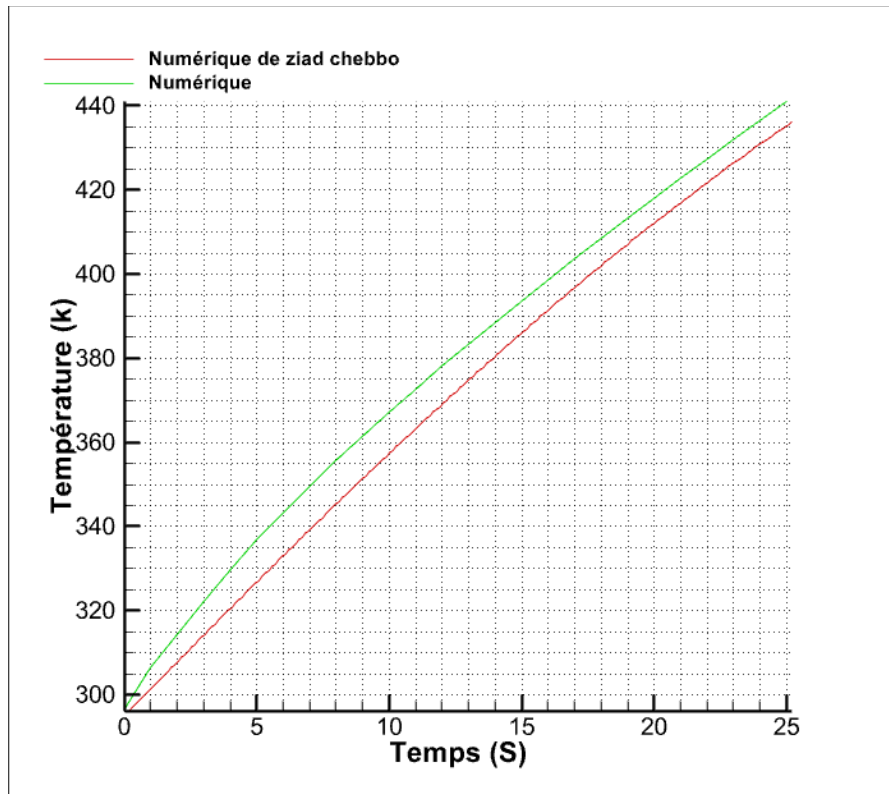


Figure 27 : distribution de température côté interface

Les deux courbes sont de même allure et Les résultats sont approchés et le petit écart due aux hypothèses que nous avons posées.

Les résultats des températures obtenue à côté fil et côté interface tube-manchon sont approchés aux résultats numériques de chebbo.

5.2.2. Les paramètres de soudages

5.2.2.1. Comparaison entre le modèle avec espacement et sans espacement

La figure 28 et 29 a permis d'étudier l'influence d'espacement entre le manchon et le tube sur l'évolution de la température coté fil et interface, les résultats présentés confirment, l'espacement influe grandement sur l'évolution de la température dans la partie de chauffage.

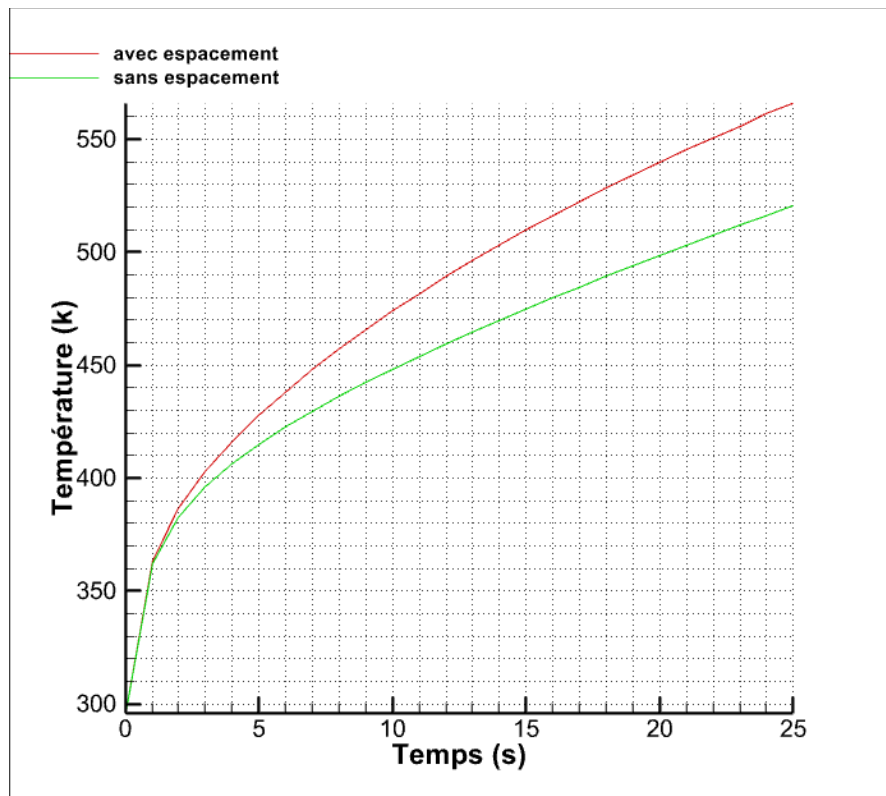


Figure 28 : comparaison entre le modèle avec espacement et sans espacement à côté fil

Au début, les températures étaient identiques dans les deux cas, après environ 5 secondes de chauffage la différence entre les températures des deux cas à augmenter, et cela est due à la faible conductivité de l'air par rapport à la conductivité de PEHD, c'est-à-dire que l'espacement de l'air empêche un peu le passage de la chaleur.

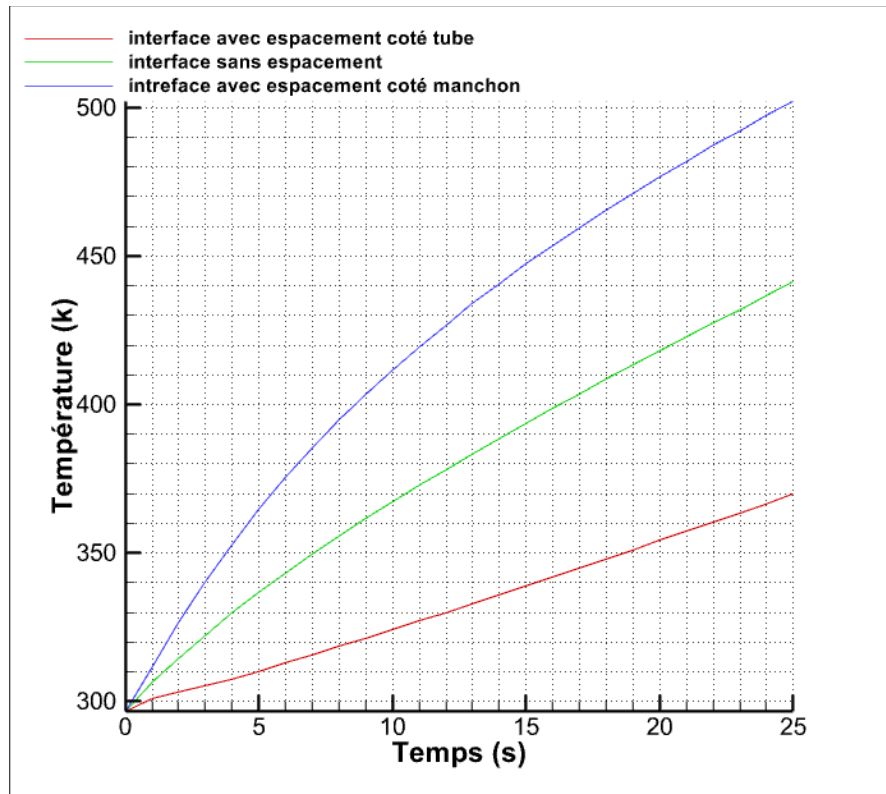


Figure 29 : comparaison entre le modèle avec espacement et sans espacement à côté interface

La conductivité thermique a un effet qui apparait par la comparaison entre la courbe (interface avec espacement côté tube), la courbe (interface sans espacement) et la courbe (interface avec espacement côté manchon), en remarque que la courbe de la distribution de la température sans espacement au niveau de l'interface tube-manchon reste supérieur à la courbe de la distribution de température avec espacement au niveau tube, Cette écartement due à la grande différence entre la conductivité thermique du PEHD et du l'AIR .

L'effet d'espacement entre le tube et le manchon présenté en évidence par la comparaison entre la courbe(interface avec espacement côté tube) et la courbe (interface avec espacement côté manchon), la divergence entre les deux courbes apparait et augmente jusqu'à la fin de chauffage, on peut justifier cette différence par le retard de l'échauffement du tube due à la distance par rapport à la source de chaleur d'un côté et à la faible conductivité du l'air (présente un isolant thermique) d'un autre côté.

Une fois la matière est suffisamment dilatée le contact entre le tube et le manchon devient parfait, et l'espacement n'intervient pas sur l'évolution de la température mais comme nous n'avons pas pris en considération le phénomène de dilatation thermique la différence après la fin

de chauffage reste stable.

5.2.2.2. L'influence de distances entre le fil chauffant et l'interface

La figure 30 et 31 a permis d'étudier l'influence de distance entre le fil et l'interface sur l'évolution de la température au niveau de fil et de l'interface, cette variation influe grandement sur l'évolution de la température dans la partie de chauffage.

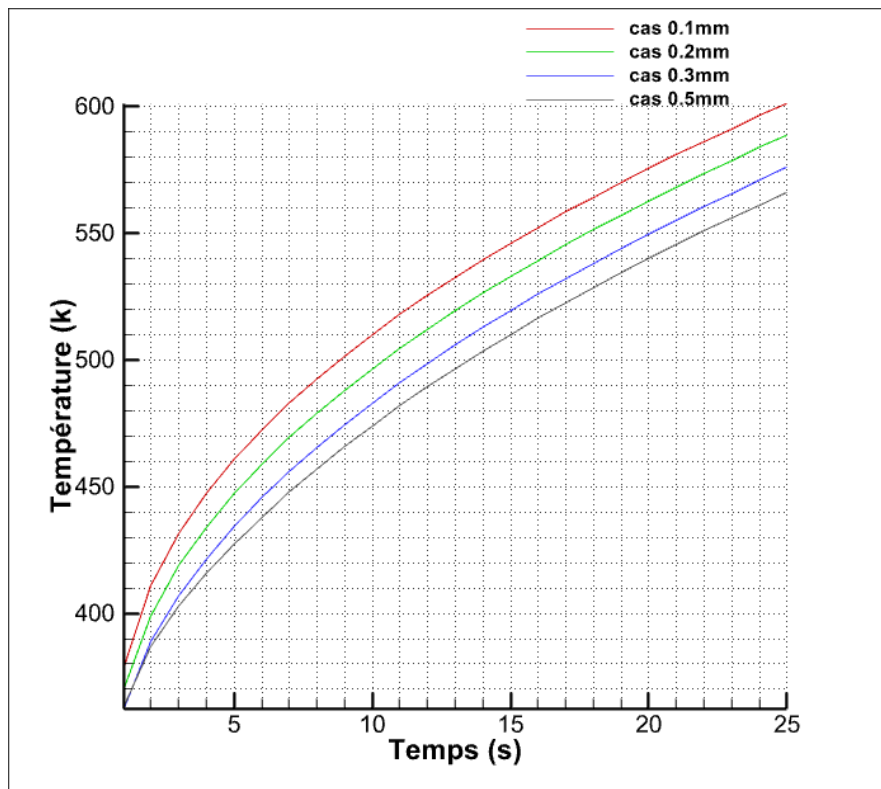


Figure 30 : l'influence de la distance entre le fil et l'interface dans le modèle avec espacement au niveau du fil chauffant

L'influence de la distance par rapport au fil chauffant présente en évidence par la comparaison entre les quatre courbes au-dessus, qui représentent la distribution de température dans le fil en chaque distance : 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm (référence), en constate que quand on a diminué la distance entre le fil et l'interface les températures au cours du chauffage augmentent, cette augmentation due à la concentration excessive de chaleur au niveau du fil chauffant, à partir d'une distance inférieure à 0.1mm on peut entraîner une surchauffe locale du matériau donc une dégradation du matériau (PEHD).

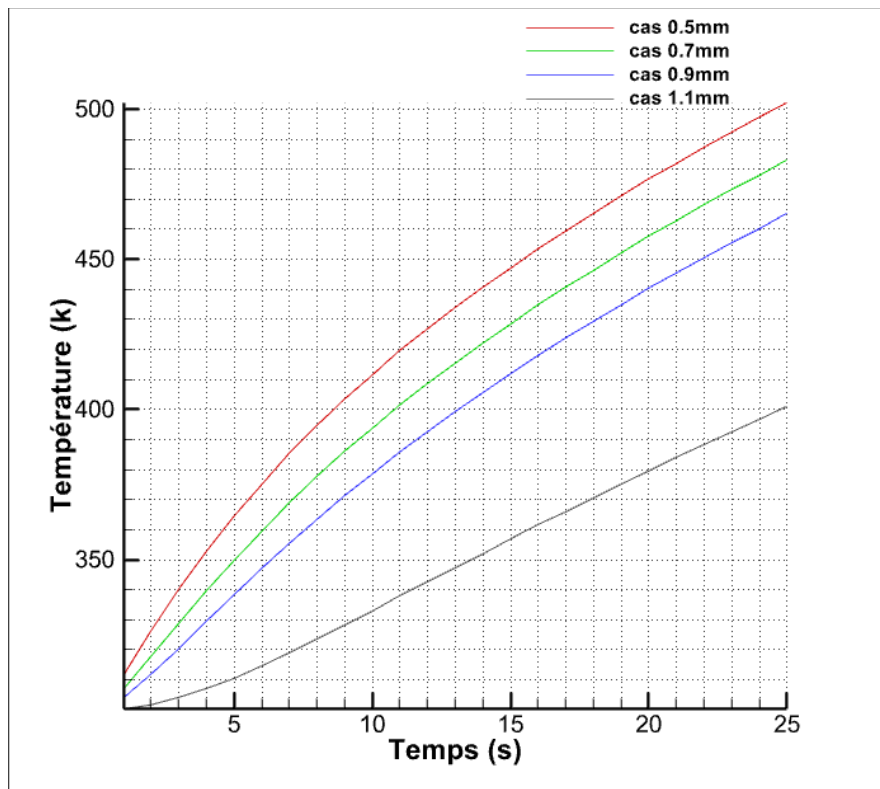


Figure 31 : l'influence de la distance entre le fil et l'interface dans le modèle avec espacement au niveau de l'interface côté manchon

L'influence de la distance par rapport au fil chauffant présente en évidence par la comparaison entre les quatre courbes au-dessus, qui représentent la distribution de température dans l'interface côté manchon en chaque distance : 0.5mm (référence), 0.7mm, 0.9mm, 1.1mm, en constate que les valeurs des températures au cours du chauffage sont diminuée lorsque la distance entre le fil de résistance et l'interface de manchon est trop grand, cette diminution peut être due à la quantité de chaleur transmise au matériau PEHD était insuffisante pour assurer une fusion complète. Cela peut entraîner des défauts de soudure tels que des pores, des vides ou une mauvaise liaison entre les pièces à souder. Une soudure avec des défauts de ce type peut être plus susceptible de se fissurer ou de se dégrader avec le temps.

5.2.2.3. L'influence de distances entre les fils chauffants

La figure 32 et 33 a permis d'étudier l'influence de position du fil chauffant sur l'évolution de la température au niveau de matériau entre les fils et au niveau de l'interface côté manchon, cette variation influe grandement sur l'évolution de la température dans la phase de chauffage.

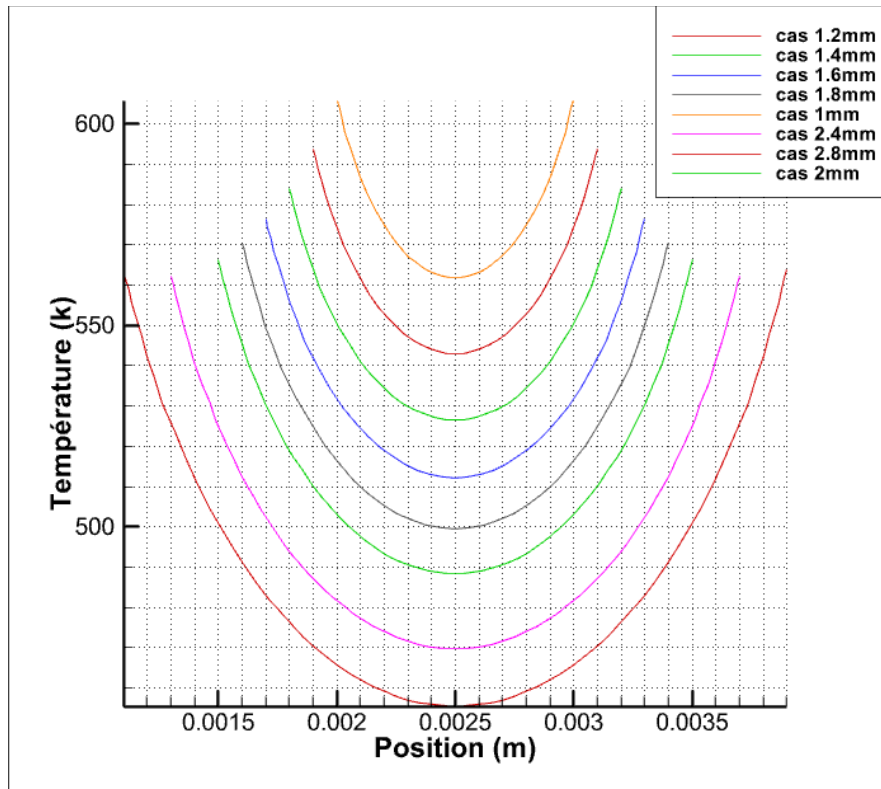


Figure 32 : distribution de température entre les fils chauffants en chaque distance entre eux

L'influence de distance entre les fils chauffants présente en évidence par la comparaison entre les courbes au-dessus, qui représentent la distribution de température en fonction de la position en chaque distance : 1mm, 1.2mm, 1.4mm, 1.6mm, 1.8mm, 2mm(référence), 2.4mm, 2.8mm, Lorsque les fils de résistance sont placés à une distance appropriée (cas de 2mm), la chaleur est distribuée de manière équilibrée, Cela permet une fusion homogène du matériau, créant ainsi une liaison solide. Si la distance entre les fils de résistance est très grande, la chaleur générée est insuffisante pour entraîner des zones de fusion, ce qui peut compromettre la qualité de la soudure. Une distance très petite entre les fils de résistance peut entraîner une accumulation excessive de chaleur donc conduire à une surchauffe du matériau qui produit la dégradation thermique.

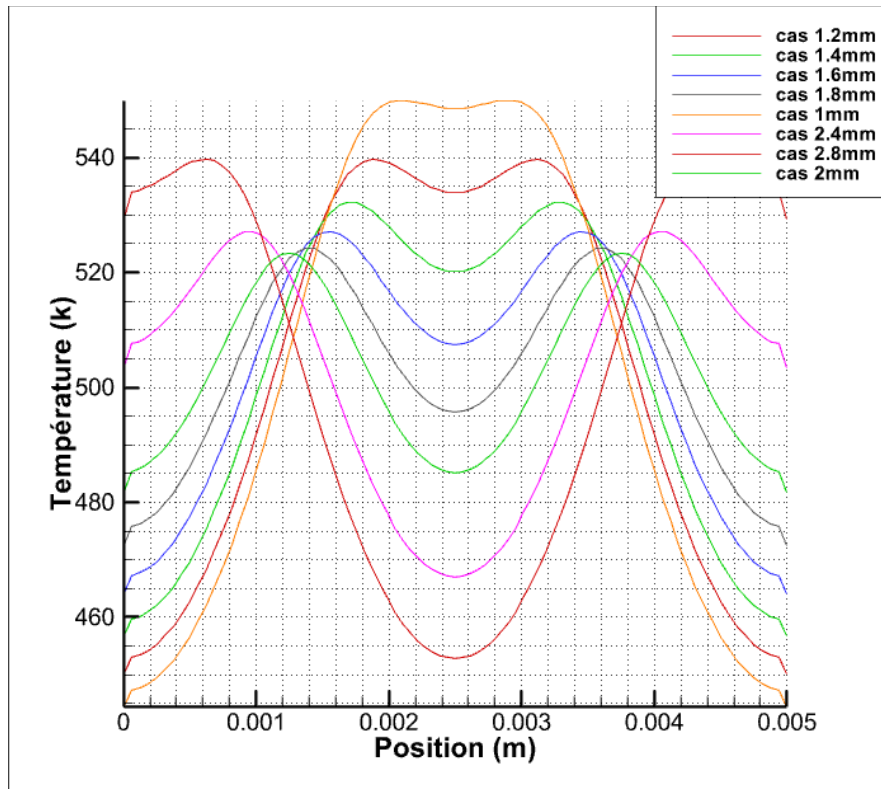


Figure 33 : l'influence de distance entre les fils chauffants sur la distribution de température au niveau d'interface côté manchon

L'influence de distance entre les fils chauffants sur la distribution de température au niveau d'interface côté manchon présente en évidence par la comparaison entre les courbes au-dessus, en fonction de la position dans chaque distance : 1mm, 1.2mm, 1.4mm, 1.6mm, 1.8mm, 2mm(référence), 2.4mm, 2.8mm, en remarque qu'une distance courte entre les fils chauffants permet un transfert de chaleur plus rapide et plus efficace vers la zone de soudure du PEHD, la conduction thermique est favorisée ce qui permet une diffusion plus uniforme de la chaleur sur l'interface côté manchon, et la température est mieux régulée, ce qui réduit les risques de surchauffe ou de sous-chauffe de la soudure et assure une liaison solide et continue entre les surfaces de contact du manchon et du tuyau PEHD.

Une distance plus longue entre les fils chauffants peut entraîner une transmission inefficace de la chaleur vers la zone de soudure, avec des zones plus chaudes près des fils chauffants et des zones plus froides éloignées de ceux-ci, et ces derniers peuvent conduire à des imperfections dans la soudure, telles que des poches d'air, des fissures ou des zones faiblement soudées.

5.2.2.4. L'influence de diamètre de fil chauffants

La figure 34 (a et b) a permis d'étudier l'influence de diamètre du fil chauffant sur l'évolution de la température au niveau de fil et au niveau de l'interface côté manchon, cette variation influence grandement sur l'évolution de la température dans la partie de chauffage.

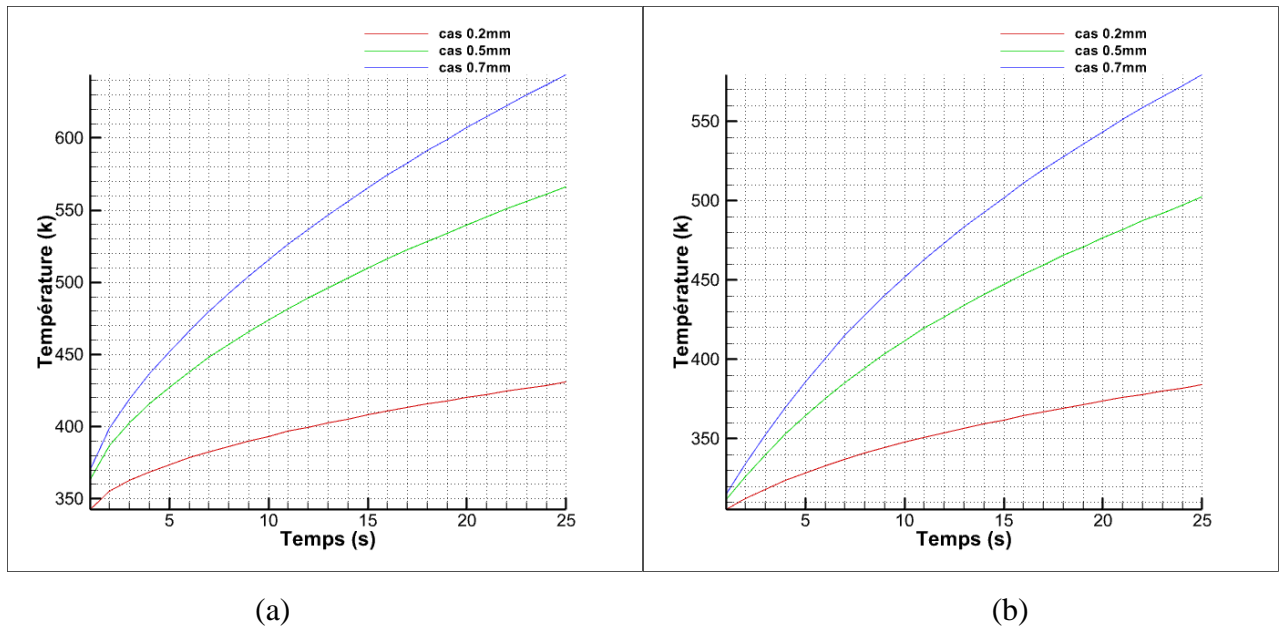


Figure 34 : l'influence du diamètre de fil de résistance sur la distribution de température au niveau (a) au niveau de fil chauffant ; (b) de l'interface côté manchon

L'influence de diamètre de fil de résistance sur la distribution de température du matériau PEHD qui en contact avec lui présente en évidence par la comparaison entre les courbes au-dessus, qui représentent la distribution de température dans la zone autour du fil chauffant en fonction du diamètre de résistance : 0.2mm, 0.5mm(référence), 0.7mm, en remarque que le diamètre du fil de résistance peut affecter plusieurs aspects de la procédure de soudage, notamment la distribution de la chaleur , la qualité de la soudure :

- Un fil de résistance de diamètre supérieur à 0.5mm donne une grande surface de contact avec le matériau PEHD, ce qui peut améliorer la répartition de la chaleur, une répartition uniforme de chaleur est essentielle pour obtenir une fusion homogène mais d'autre part le matériau peut être atteint de très grandes températures de fusion au niveau du fil mais au niveau de l'interface côté manchon cela peut aider à distribuer la chaleur plus efficacement et plus uniforme sur une grande surface , ce qui permet une fusion homogène du PEHD qui conduit à une soudure plus solide.

Chapitre 5 Résultats et discussion

- Un fil de résistance de diamètre inférieur à 0.5mm peut avoir une surface de contact réduite avec le matériau PEHD, cela peut conduire à des problèmes de fusion et de qualité de la soudure dans la zone de contact tube-manchon et cela peut entraîner des soudures faibles. Par contre au niveau de l'interface côté manchon la chaleur est insuffisante pour assurer la fusion de la matière ce qui peut entraîner des défauts de soudure.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

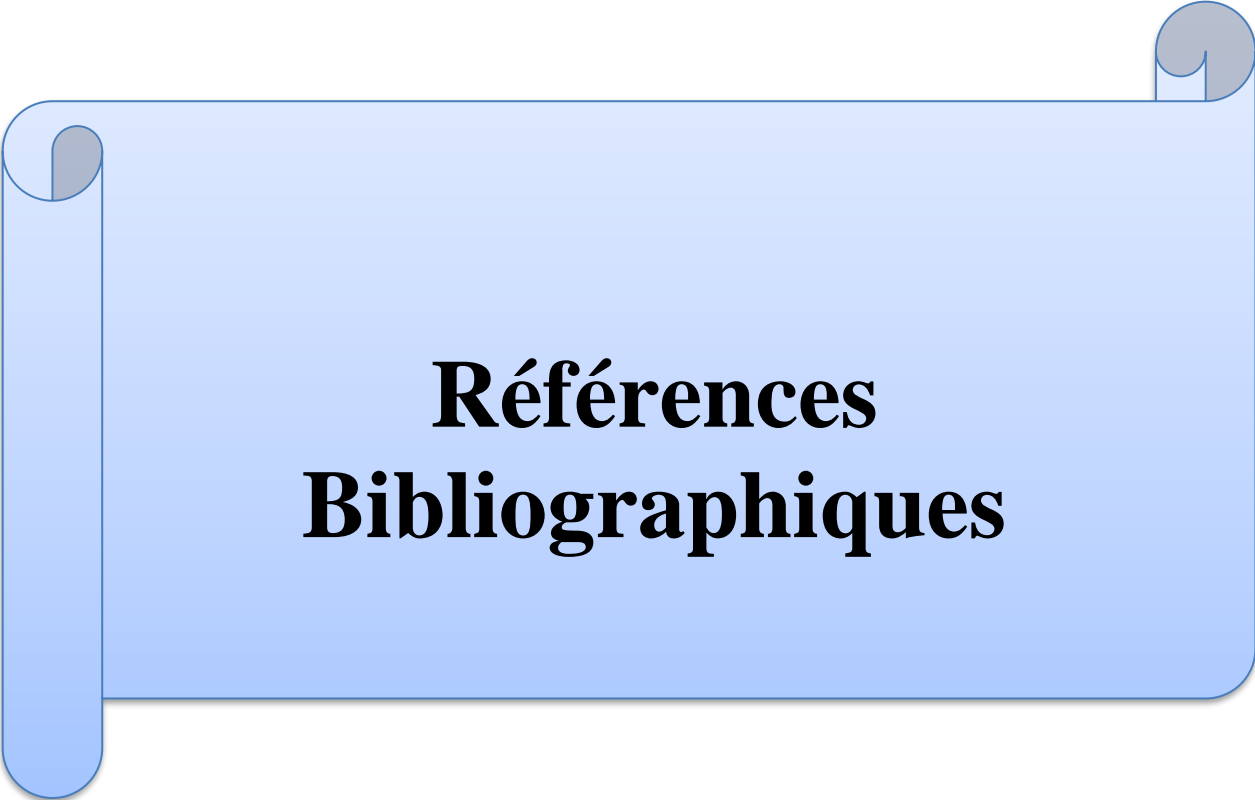
Dans cette étude nous avons montré que la distribution de température et la qualité de soudure sont fortement dépendantes de paramètres de soudage.

- ✓ Les résultats présentés confirment que **l'espacement entre le manchon et le tube** influe grandement sur l'évolution de la température dans la phase de chauffage. Tel-que l'espacement de l'air résiste le passage de la chaleur et travail comme un isolant au contraire dans le cas où il n'y a pas espacement (cas de contact parfait).
- ✓ En constate que quand on a diminué **la distance entre le fil et l'interface coté manchon** les températures au cours du chauffage augmentent, cette augmentation due à la concentration excessive de chaleur, au niveau du fil chauffant à partir d'une distance inférieure à **0.1mm** on peut entraîner une surchauffe locale du matériau donc une dégradation du PE. Et d'un autre côté si **la distance entre le fil de résistance et l'interface coté manchon** est grande à **0.5** la quantité de chaleur transmise au matériau PEHD peut être insuffisante pour assurer une fusion parfaite cela peut entraîner des défauts de soudure tels que des pores, des vides ou une mauvaise liaison entre les pièces à souder. Une soudure avec des défauts de ce type peut être plus susceptible de se fissurer ou de se dégrader avec le temps.
- ✓ **Une distance très petite entre les fils de résistance** peut entraîner une accumulation excessive de chaleur donc conduire une surchauffe du matériau qui engendrée par une dégradation thermique. **Une distance plus longue entre les fils chauffants** peut entraîner une transmission inefficace de la chaleur vers la zone de soudure, avec des zones plus chaudes près des fils chauffants et des zones plus froides éloignées de ceux-ci, et ces derniers peuvent conduire à des imperfections dans la soudure, telles que des poches d'air, des fissures ou des zones faiblement soudées.
- ✓ **Un fil de résistance de diamètre supérieur à 0.5mm** donne une grande surface de contact avec le matériau PEHD, ce qui peut améliorer la répartition de la chaleur mais d'autre part le matériau peut être atteindre à l'étape de dégradation par contre **un fil de résistance de diamètre inférieur à 0.5mm** peut avoir une surface de contact réduite avec le matériau, cela peut conduire des problèmes de fusion et de mauvaise qualité de soudure.

Finalement une distance appropriée **2mm** entre les fils , **distance entre le fil et l'interface coté manchon** est égale à **0.5 mm** et **un fil de résistance de diamètre** égale à **0.5mm** permet une fusion homogène du matériau, garantit également une transition

Conclusion Générale

progressive de température entre les surfaces et évitant les zones de fusion inadéquates et les points faibles dans le joint, ce qui réduit les risques de surchauffe ou de sous-chauffe de la soudure et assure une liaison solide et continue entre les surfaces de contact du manchon et du tuyau PEHD,



**Références
Bibliographiques**

Références Bibliographiques

- [1] O. Hehn [analyse expérimentale et simulation thermomécanique du soudage bout à bout de tubes de polyéthylène]. Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris. 13 juillet 2006.
- [2] Z. CHEBBO [Etude numérique et expérimentale du soudage par électrofusion de tubes en polyéthylène]. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de Paris. 16 décembre 2013.
- [3] L. Zaidi. Etude de la dégradation thermique de polymères soudables : Cas des réseaux de distribution du gaz naturel. Thèse magistère, Université BADJI MOKHTAR, Annaba, 2011.
- [4] Norme ISO 4437.
- [5] Norme EN 12201-1 (2011) [Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE) - Partie 1 : généralités].
- [6] Comment se fait-elle une soudure par électrofusion des tuyaux et des accessoires en PE? « <https://www.soudureplastique.ma/comment-se-fait-elle-une-soudure-par-electrofusion-des-tuyaux-et-des-accessoires-en-pe/> ».
- [7] F.P. Incorpera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman et A.S. Lavine [Fundamentals of heat and mass transfer] sixième édition (2006).
- [8] Bernard Grandjean ©2013 [Volume 1 : Notes de cours] livre Transfert de chaleur.
- [9] Avrami M. «Kinetics of phase change. I. General theory». Journal of Chemical Physics. 7:1103; 1939.
- [10] Avrami M. «Kinetics of phase change. II. Transformation-time relations for random distribution of nuclei». Journal of Chemical Physics. 8:212; 1940.
- [11] Avrami M. «Kinetics of phase change. III. Granulation, phase change, and microstructure». Journal of Chemical Physics. 9:177; 1941.
- [12] Ozawa T. «Kinetics of non-isothermal crystallization». Polymer. 12:150; 1971.
- [13] Shi, J., Zheng, J., Guo, W., Xu, P., Qin, Y., & Zuo, S. (2009). A model for predicting temperature of électrofusion joints for polyethylene pipes. Journal of pressure vessel technology, 131 (6).
- [14] Bowman J., Medhurst T., Portas R. (1992) "Procedures for Quantifying the Strength of Électrofusion Joints". Proc. Plastics Pipes WZZ, paper B2 f 5, The Plastics and Rubber Institute, London.
- [15] Bowman. J. (1997) "A review of the électrofusion joining process for polyethylene pipe systems". Polymer Engineering and Science. Vol. 37,674-691.
- [16] Pitman G.L. (1985) "Électrofusion welding prediction and computer-Aided design of fittings". Proceedings of the Plastics Pipes VI, Paper 29.
- [17] Dufour D., Meister E. (1989) "Polyethylene électrofusion technique: Prediction model of

Références Bibliographiques

welding quality”. International Gas Research Conference, Japan, 232- 242.

[18] O’Donoghue P.E., Kanninen M.F., Green S.T., Grigoty S.C. (1991) “Results of a thermo-mechanical analysis model for electrofusion joining of PE gas pipes”. Proceedings of the 12th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, Boston, USA. 341- 342.

[19] Kanninen M.F., Buczala G.S., Kuhlman C.J., Green S.T., Grogory S.C., O’Donoghue P.E., McCarthy M. A. (1992) “A theoretical and experimental evaluation of the long-term integrity of an electrofusion joint”. Proceedings of Plastics Pipes VIII, Koningshof, Neherlands, B2/3.1-10.

[20] Nakashiba A., Nishimura H., Inoue F., Nakagawa T., Homma K., Nakazato H. (1993) “Fusion Simulation of Electrofusion Polyethylene Joints for Gas Distribution”. Polymer Engineering and Science. Vol. 33, 1146–1151.

[21] Nishimura H., Inoue F., Nakashiba A. (1994) “Design of Electrofusion Joints and Evaluation of Fusion Strength Using Fusion Simulation Technology”. Polymer Engineering and Science. Vol. 34, 1529–1534.

[22] Rosala G.F., Day A.J., Wood A.S. (1996) “A finite element model of the electrofusion welding of thermoplastic pipes” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 211 Part E.

[23] Fujikake M., Fukumura M., Kitao K. (1997) “Analysis of the electrofusion joining process in polyethylene gas piping systems”. Computers and Structures. Vol. 64, 939-948.