



Contribution à l'étude thermique des étapes de soudage bout à bout des tubes en polyéthylène à haute densité

Auteurs : Salaheddine AZZOUZ^{1,2}, Slimane NIOU¹, Nassima MALLEM², Kamel CHAOU¹

¹LR3MI, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba 23000, Algérie

²Ecole Supérieure des Technologies industrielles, Annaba, Algérie

azzouzsalah@yahoo.fr

Résumé : Le processus du soudage bout à bout est l'un des processus les plus efficaces dans le raccordement des tubes en polyéthylène, il est divisé en quatre phases : égalisation, chauffage, retrait de la plaque et refroidissement. Dans cet article nous intéressons uniquement aux deux premières phases, égalisation et chauffage, qui représentent les étapes les plus importantes dans l'opération de soudage. Pour cela on a examiné la variation de la température dans les deux dimensions axiale et radiale en fonction du temps par l'utilisation de la méthode des différences finies avec un schéma pondéré de Méthode de Cranck Nicolson et le code développé a été implanté sous l'environnement Matlab.

Mots clés : Polyéthylène ; Soudage ; Bout à bout ; Transfert thermique ; schéma pondéré.

1. Introduction

Les réseaux de canalisations enterrés et construits en polyéthylène constituent la grande partie des moyens de transport et de distribution d'eau (fluide incompressible) et de gaz naturel (fluide compressible) à des pressions relativement importantes. Techniquement, plusieurs méthodes ont été développées pour joindre 2 bouts de tubes en usant de la chaleur pour faire fondre le HDPE pour assurer un mélange de matière en fusion résistant et tenace. Il est clair que plusieurs facteurs entrent en jeu et les conséquences d'un mauvais joint sont désastreuses pour la sécurité des vivants et leur environnement, pour cela plusieurs chercheurs ont étudiés le procédé de soudage bout à bout dans les tubes en polyéthylène de haute et moyenne densité. De nombreux procédés ont été développés, ils diffèrent par la manière dont la chaleur est appliquée et à l'équipement utilisé. Il ressort de la littérature que la modélisation du procédé de soudage bout à bout a été réalisé par: Wolters et al [1] qui se sont intéressés par les mécanismes actifs pendant la phase d'égalisation. Les étapes du procédé de Pimputkar [2] se limite à la phase de chauffage (sans pression imposée) et à la phase de soudage (plaquage des tubes l'un sur l'autre avec une pression), son modèle permet de prédire la température et le déplacement de matière au cours du temps lors du procédé. Shillitoe et al [3] ont simulé uniquement les trois premières secondes de la phase d'égalisation, le calcul est fait sur un maillage comprenant seulement 2 mm du tube à partir du miroir chauffant. Cette simulation est restreinte au niveau du contact avec le miroir et en surface du tube. Parmi les quatre phases du soudage bout à bout, Benkreira et al[4] ont étudié la phase d'égalisation avec un modèle de lubrification. Le modèle permet de déterminer la vitesse d'avancée du tube ainsi que la taille de la couche de polymère fondu durant cette phase. Le modèle permet aussi de déterminer la position du plan de cisaillement nul et la position du plan où s'effectue le changement de phase de l'écoulement suivant le rayon. La plupart des auteurs se limitent uniquement à l'analyse de la première phase, en s'intéressant aux premières secondes de la phase, ou à l'étude de chaque phase indépendante. Dans ce cas seulement le mode de conduction a été traité. La combinaison des modes de transfert thermique conduction-convection-rayonnement, ne sera pas tenue en compte, hypothèse négligeant le cas réel. Dans le présent article nous traiterons l'aspect thermique dans les deux phases, égalisation et chauffage, on les considère comme une seule phase et ce en combinant les deux modes de transfert thermique conduction-convection, situation qui se rapproche plus du cas réel. Effectivement le mode de transfert thermique par convection intervient dès les premières secondes de la phase d'égalisation. Numériquement, on a utilisé la méthode des différences finies schéma pondéré qui utilise la moyenne arithmétique implicite et explicite pour arriver à des conditions stables.

2. Description du procédé

Le soudage bout à bout est une technique d'assemblage des thermoplastiques par la fusion des extrémités des deux tubes au moyen d'une plaque chauffante. Au cours de ce procédé, les deux tubes sont chauffés par la plaque chauffante, l'opération de chauffage se fait par les deux modes de transfert thermique conduction et convection. Le mode de transfert de la chaleur entre les parois cylindriques du tube et la surface du miroir est la conduction. Les surfaces intérieure et extérieure du tube sont en contact avec l'air ambiant, ce qui correspond au mode de transfert par convection.

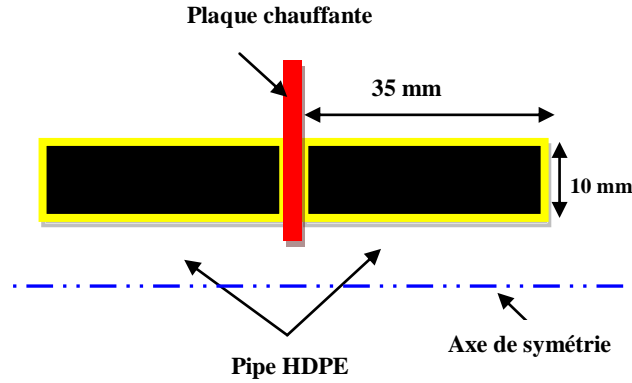


Figure 1 : Tubes à souder avec la plaque chauffante.

2. Modèle mathématique

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

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] + \left(\frac{d\lambda}{d\theta} \right) \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$r_i < r < r_e, z > 0$ à $t > 0$

Conditions aux limites

- **Phase initiale:**

Le champ de température initiale $\theta(r, z)$ dans le tube sera pris égal à la température ambiante ($\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$).

$$r_i \leq r \leq r_e : \theta(r, z, t) = \theta_0 \quad \text{à } t = 0 \quad (2)$$

- **phases d'égalisation et de chauffage :**

$$r_i < r < r_e : \theta(r, 0, t) = \theta_p \quad \text{à } 0 < t < t_{eg} \quad (3)$$

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

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

$$r = r_i, z \geq 0 : \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{h}{\lambda} (\theta - \theta_a) \dots \dots \text{à } 0 < t < t_{ch} \quad (4)$$

$$r = r_e, z \geq 0 : \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{h}{\lambda} (\theta_a - \theta) \dots \dots \text{à } 0 < t < t_{ch} \quad (5)$$

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

TABLE 1: Caractéristiques thermiques de polyéthylène (HDPE) dans la température ambiante

Paramètre	Valeur
Chaleur Spécifique (c) ($J/kg.K$)	2600
Conductivité thermique (λ) ($W/m.K$)	0.33
Masse volumique (ρ) (Kg/m^3)	997
Coefficient de convection (h) ($W/m^2.K$)	15

Le profil radiale est divisé en n_r éléments avec un pas d'espace Δr , et le profil axial est divisé en n_z éléments avec un pas Δz . n_r correspond à une distance physique $r = 0.01\text{m}$ et n_z correspond à une longueur $z = 0.005\text{ m}$ (la région la plus proche au plan de soudage), le temps total des deux phases, égalisation et chauffage, est 200 s (cycle standard). $t_{\text{eg}}= 25\text{s}$, $t_{\text{ch}}=175\text{s}$, $\theta_a = 20^\circ\text{C}$, $\theta_p = 230^\circ\text{C}$.

L'équation (1) est résolue numériquement par la méthode des différences finies, schéma de Cranck & Nicolson. Les coordonnées (r, z, t) sont représentées par:

$$r = i.\Delta r;$$

$$z = j.\Delta z ;$$

$$t = k$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\theta_{(i,j)}^{k+1} - \theta_{(i,j)}^k}{\Delta t} ; \quad (6)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{1}{i\Delta r} \left(\alpha \cdot \frac{\theta_{(i+1,j)}^{k+1} - \theta_{(i-1,j)}^{k+1}}{2(\Delta r)} + (1 - \alpha) \cdot \frac{\theta_{(i+1,j)}^k - \theta_{(i-1,j)}^k}{2(\Delta r)} \right) ; \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} = \alpha \cdot \frac{\theta_{(i-1,j)}^{k+1} - 2\theta_{(i,j)}^{k+1} + \theta_{(i+1,j)}^{k+1}}{(\Delta r)^2} + (1 - \alpha) \cdot \frac{\theta_{(i-1,j)}^k - 2\theta_{(i,j)}^k + \theta_{(i+1,j)}^k}{(\Delta r)^2} ; \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \alpha \cdot \frac{\theta_{(i,j-1)}^{k+1} - 2\theta_{(i,j)}^{k+1} + \theta_{(i,j+1)}^{k+1}}{(\Delta z)^2} + (1 - \alpha) \cdot \frac{\theta_{(i,j+1)}^k - 2\theta_{(i,j)}^k + \theta_{(i,j-1)}^k}{(\Delta z)^2} ; \quad (9)$$

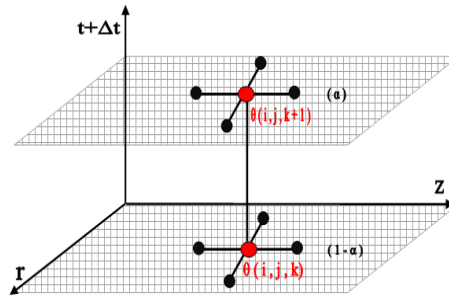


Figure 2 : Nœuds discrétisés au schéma pondéré

3. Résultat et discussion :

Dans la figure 3 on présente le champ de température dans l'épaisseur du tube, pour $r_i < r < r_e$, et pour différentes valeurs de z . Le zéro dans le coté gauche représente le rayon intérieur et à droite à 0.01 m le rayon extérieur. On constate une symétrie dans la distribution de la température dans les deux cotés. Au fur à mesure qu'on s'éloigne de la plaque chauffante, les champs de température en fonction de z ont tendances à se rapprocher.

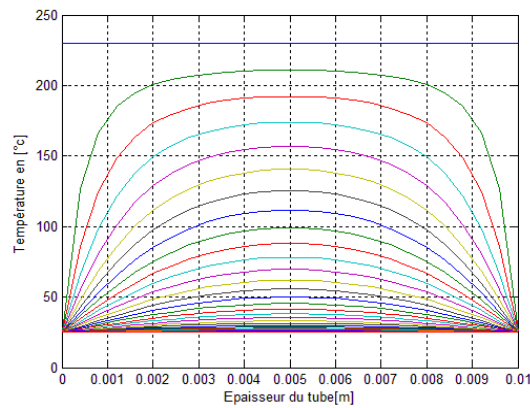


Figure 3 : Prédiction de la température dans le profil radial en fonction de z.

L'Analyse de la distribution de la température dans la longueur du tube montre qu'elle est monotone décroissante à partir du plan de soudage. Au début du plan de chauffage jusqu'à la distance 3 mm, on constate une très importante pente, puis on tend l'atténuation de cette dernière

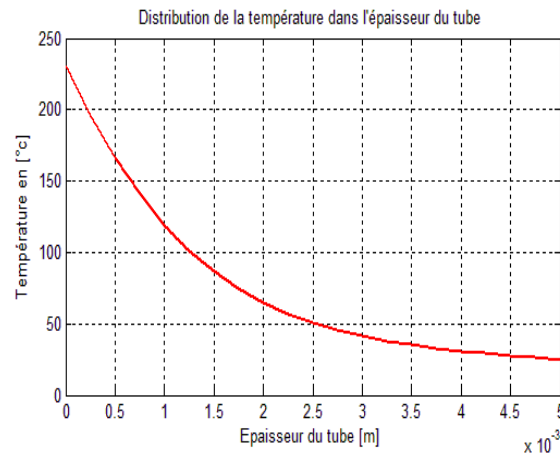


Figure 3 : Prédiction de la température dans le profil axial

La figure 5 montre l'évolution de la température à l'interface miroir/tube lors des phases d'égalisation (0 à 20s) et de chauffage (21 à 200s), la température monte rapidement, pendant 15 s, à 198°C puis elle continue à augmenter mais avec une pente beaucoup plus faible. La température enregistrée en fin de chauffage reste toujours inférieure à la température du miroir 220°C.

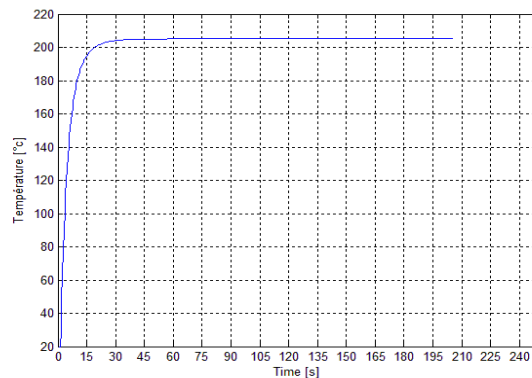


Fig.5. Variation de la température en fonction du temps

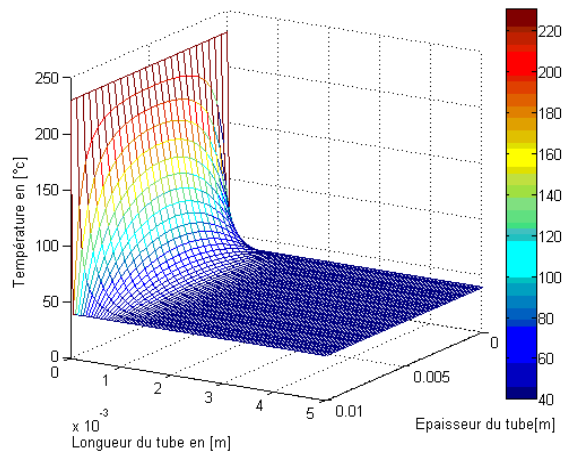


Figure 6 : Evolution de la température dans les deux profils axial et radial à l'instant $t=200s$

CONCLUSION

Au cours de ce travail, nous avons modélisé la répartition des températures dans la phase d'égalisation et de chauffage de l'opération de soudage des tubes en polyéthylène à haute densité. La chaleur émise par la plaque chauffante est décrite par un modèle numérique à deux dimensions avec l'utilisation de la méthode des différences finies, schéma pondérés couplé à un processus itératif qui a permis de simuler la répartition des températures dans la région proche au plan de soudage. On peut conclure que cette étude a permis d'apporter une approche raisonnable dans la résolution du problème transitoire au cours du procédé de soudage bout à bout. En perspective, nous étudierons toutes les phases de l'opération de soudage avec couplage des conditions de l'environnement.

Nomenclature

Symbole	Nom, unité	Exposant, Indices
C	chaleur spécifique HDPE, $J/kg \cdot K$	a air
h	coefficient de convection, $W/m^2 \cdot K$	ch chauffage
K	conductivité thermique, $W/m \cdot K$	e extérieure
n	nœuds radiales	eg égalisation
r	rayon, m	i incrément d'espace suivant r,
T	température, K	j incrément d'espace suivant z,
t	temps, s	k exposant du temps
z	longueur, m	0 initiale
		p paroi
		r radiale
		z axiale
Symboles grecs		
ρ	masse volumique du polyéthylène, kg/m^3	
θ	température, $^{\circ}C$	

Références

- [1] M.Wolters,B. Venema, Le soudage bout à bout de tubes de polyéthylène, *Souder*,. 4:213, 1987.
- [2] S.M.Pimputkar, The effect of joining conditions in the butt fusion of polyethylene pipes, *Proceedings of the Tenth Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, 0:38, 1987.
- [3] S. Shillitoe,A.J. Day, H. Benkreira, A finite element approach to butt fusion welding analysis, *.Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 204:95, 1990
- [4] H. Benkreira, S. Shillitoe, A.J. Day. and T. Stafford, Butt fusion joining of polyethylene pipes: a theoretical approach,. *Presented at Advances in Joining Plastics and Composites, Paper 28, University of Bradford*, 10-12 June 1991.
- [5] David R.Croft, Heat transfer calculations using finite difference equations, *Applied science publishers LTD London*, 1977