

# ETUDE NUMERIQUE DE LA VARIATION DE TEMPERAURE DANS LE SOUDAGE A L'ARC ELECTRIQUE SOUS FLUX SOLIDE DES ACIERS A FAIBLES POURCENTAGE DE CARBONE

C. DERFOUF & D A. ALIOUALI

Département de Mécanique, Université de Biskra, B.P. 145, Biskra-07000- Algérie  
<sup>1</sup>: [chems.derfouf@gmail.com](mailto:chems.derfouf@gmail.com), and <sup>2</sup>: [aalioukadour@yahoo.fr](mailto:aalioukadour@yahoo.fr)

## RESUME

Dans le soudage des aciers le rôle de l'étude numérique est nécessaire et utile dans l'estimation de la limite de la largeur de valeur de la zone affectée thermiquement dite ZAT. Seulement quelques publications ont considéré au cours du soudage la source de chaleur mobile lorsque celui-ci est en progression en fonction du temps, entre une température initiale et finale afin de définir la variation de température et sa diffusion à travers la ZAT [1-4].

Dans ce travail, une méthode approximative de déduction de la largeur de la ZAT a été développée et a donné de raisonnables résultats, avec cette approche proposée, une adéquate concordance entre la largeur de la ZAT déduite numériquement, les températures de changements de phases des aciers et les valeurs de micro-dureté a été établie.

Aussi l'aspect original de recherche que comporte ce travail, du fait que celle-ci s'est effectuée lors d'un soudage en progression et a été élaboré pour déduire :

- L'effet du soudage automatique à l'arc électrique sur les propriétés mécaniques des aciers à faible pourcentage en carbone en utilisant les éprouvettes de micro-dureté.
- Identification exacte des valeurs de micro-dureté avec la détermination localisée de leurs lieux (proche et à l'intérieure de la ZAT).

**Mots cle** : Etude numérique – soudage en progression – aciers – ZAT.

## ABSTRACT

Numerical study is useful as well as necessary in the assessment of the width limit of the heat affected zone (HAZ) as far as steel welding is concerned. Only limited published work has considered a mobile heat source to define the temperature variation in industrial low carbon steel (0, 19 wt. % C) when welding is in progress between the initial and final welding time [1-4].

In this present work, an approximate method of deducting HAZ width value has been developed and shown to give reasonable results. The research aspects considered herein are as follows:

- The effect of arc welding on microstructures, HAZ hardness and mechanical properties of industrial low carbon steel is studied.
- The different zones near the (HAZ) are identified and their exact size and location are determined.

An adequate agreement between calculated HAZ width value, steel phase change temperatures and HAZ hardness values has been obtained.

**KEYWORDS**: numerical study – in progress welding – steel – HAZ –

## 1 INTRODUCTION

Le soudage automatique à l'arc électrique sous flux solide est un procédé largement utilisé dans le domaine de l'industrie spécialement celle de la fabrication des

emballages métalliques et celle de la fabrication des bouteilles de gaz

Peu de travaux de recherche ont mis en évidence le soudage des aciers à faible pourcentage en Carbone [2] [6-12].

Gural et al [2] a étudié le transfert de chaleur et son effet sur la microstructure ainsi que les contraintes obtenues après soudage des aciers à faibles pourcentage en Carbone. Eroglu et Aksoy [7] ont mis en évidence l'effet de la chaleur sur la taille des grains ainsi que les changements perçus dans la ZAT des aciers à faible pourcentage en Carbone.

Les transferts de phases et le comportement mécanique durant le soudage des aciers à faible pourcentage en Carbone ont été largement investis par Bayraktar et al. [5], il a aussi étudié le mécanisme de croissance des grains durant le soudage des aciers, ces observations dans les joints de grains montrent une présence de grains grossiers à proximité de la ZF et la ZAT orientés dans la direction de la ligne d'écoulement de chaleur de la source d'énergie de soudage.

Concernant le soudage des aciers à faible pourcentage en Carbone, il est connu qu'un champ de température non uniforme produit des microstructures différentes que celles initialement observées. Dans notre étude proposée nous avons choisi de donner une approche numérique pour le soudage considéré (soudage à l'arc électrique sous flux solide) et de déduire la largeur de la ZAT sur la base de cette étude.

Une confirmation des résultats obtenus par cette étude sera proposée aussi par les résultats des tests de micro dureté.

## 2 TYPE ET CARACTERISTIQUES TECHNIQUE DU SOUDAGE

Pour La fabrication des bouteilles de gaz, le type du soudage pratiqué est le soudage à l'arc électrique automatique immergé sous flux solide.

Phase de soudage singulière

Une tension U de 115 Volts

Un courant I de 1 Ampères

Et un Taux de soudage courant de 750 Ampères

Vitesse de soudage =  $5,6 \times 10^{-2}$  m/s

Temps de cycle de soudage d'une bouteille = 25 secondes

**Tableau1 : Composition Chimique de la BS2**

Elément	C	Si	Mn	P	S
%	0.19	0.25	0.4	0.025	0.015
Elément	Al	Mo	Nb	Ti	
%	0.09	0.009	0.05	0.03	

**Tableau.2 : Composition Chimique du métal d'apport**

	C	Mn	Si	S	P
Min	0.06	0.40	-	-	-
Max	0.12	0.60	0.01	0.025	0.025

## 3 ETUDE NUMERIQUE HYPOTHESES

Q soudage représente la somme de tous les flux agissants dans le soudage

$$Q \text{ soudage} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$$

Ou :

$q_1$  : flux par conduction

$q_2$  : flux par convection

$q_3$  : flux par rayonnement

$q_4$  : flux d'enthalpie de fusion absorbée au cours du soudage.

Les flux  $q_2$ ,  $q_3$  et  $q_4$  sont négligés du faite que le soudage se fait par convection.

En tenant compte de la symétrie de la bouteille au niveau du cordon de soudage et des deux embouts à souder, la distribution de la température sera calculée sur la moitié du domaine de soudage.

L'équation différentielle partielle de la conduction déduite de l'équation d'énergie pour un élément de volume différentiel ( $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ ) du matériau est celle de l'équation générale de conduction

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + H = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

ou:

$\nabla$  : Le gradient de température

k: conductivité thermique du matériau (W/mk)

T: température variable dépendant de la position ( $x,y,z$ ) et du temps t

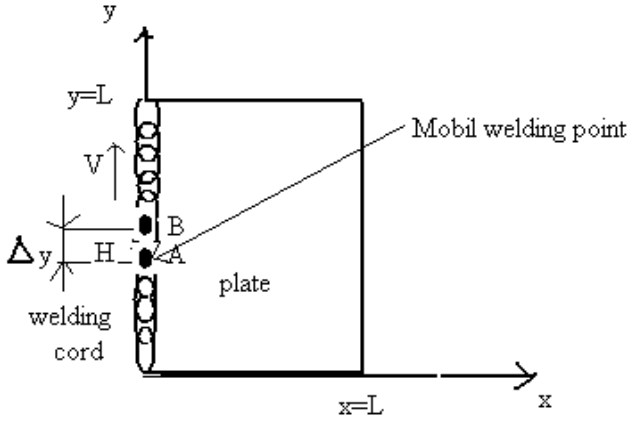
H: chaleur interne générée par unité de volume et par unité de temps.

$\rho$ : densité du matériau

$C_p$ : chaleur spécifique du matériau à pression constante

Pour résoudre cette équation les suppositions suivantes ont été prises en considérations :

1. la conduction se fait dans le plan
2.  $C_p$ ,  $\rho$ , k: considérées isotropes et constants
3. le transfert par radiation est négligeable
4. la chaleur absorbée lors de la fusion est négligeable
5. la source de chaleur est mobile le long du cordon de soudure
6. toutes les largeurs sont adiabatiques en raison de la symétrie de la source de soudage avec les pièces soudées.



\* Figure 1 : Schéma du point de soudage.

Le domaine de soudage est présenté sur la Figure 2 ci-dessous

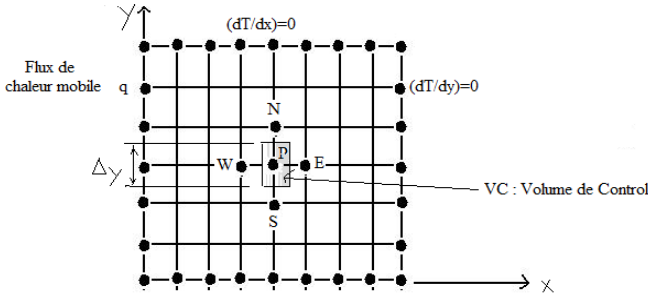


Figure 2: Maillage et disposition du modèle d'étude de la bouteille et disposition du volume de contrôle.

On considère un maillage régulier  $\Delta x = \Delta y$  et  $\Delta z = 1$

L'équation différentielle qui gouverne le régime transitoire de la diffusion de chaleur devient la suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\text{Avec } \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\text{Donc : } \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$\rho, C_p$  et  $\lambda$  sont des caractéristiques du matériau supposé constants.

Sur la face correspondante du cordon est imposée la source de chaleur (qui la source de soudage de l'A.E.S.F.S. qui se déplace le long de cette face, cette source est notée  $q$ ).

En utilisant la méthode de PATANKAR [2], est qui consiste à écrire l'équation différentielle (1) sous forme algébrique discrétisée pour un nœud du domaine de calcul après intégration sur le volume de contrôle (avec la supposition que  $\Delta z = 1$ ) entourant le nœud, en utilisant le

schéma totalement implicite recommandé par PATANKAR[2].

On obtient l'équation :

$$a_P T_P = a_W T_W + a_E T_E + a_S T_S + a_N T_N + b \quad (5)$$

$a_P, a_W, a_E, a_S, a_N$  et  $b$ : coefficients de l'équation discrétisée et le terme source étant nulle dans ce cas.

#### 4 CONDITIONS AUX LIMITES

Sur toutes les faces :

$\frac{dT}{dx}$  : par rapport à la direction  $x$  et  $\frac{dT}{dy}$  par rapport à la

direction  $y$ , correspondant à l'adiabatique du fait de la symétrie, seule sur la face du cordon ou est imposée une

source de chaleur  $q$  mobile  $q = \lambda_p \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_p$ .

Sur la frontière et en tenant compte des CAL :  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ,

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ ou } q = \lambda_p \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_p$$

En supposant la variation de température linéaire et en utilisant le schéma implicite pour l'intégration dans le temps (recommandé par PATANKAR [2]), on obtient la forme générale de l'équation (5) résolue par l'application de l'algorithme de Thomas aux problèmes deux dimensions, la résolution incrémentale itérative combinée entre la méthode de Newton et celle de Gauss Seidel, nous donne les courbes relatives aux différents temps de soudage suivantes :

Au début de soudage soit à  $t = 0,3$  seconde (figure 3)

à  $t = 7$  secondes (figure 4)

à  $t = 15$  secondes (figure 5)

à la fin de soudage (figure 6)

Enfin une courbe spécifique expliquant le comportement du flux de température juste après l'opération de soudage. (Figure 7)

La courbe de la figure 6 montre l'allure de variation de température de soudage juste après le cycle de soudage, ou autrement dit lors du refroidissement cela provoque la création de la Z.A.T identifiée par le code couleur de température et représentant la diffusion de la température dans le métal [5].

Une étude numérique plus détaillée dans le but de voir le comportement de la température au voisinage du cordon de soudure dans le but d'identifier numériquement les limites de la ZAT avec un modèle plutôt raffiné de maillage au voisinage du cordon et moins maillé à la limite et en dehors de la ZAT.

Le maillage proposé est présenté en Figure 8.

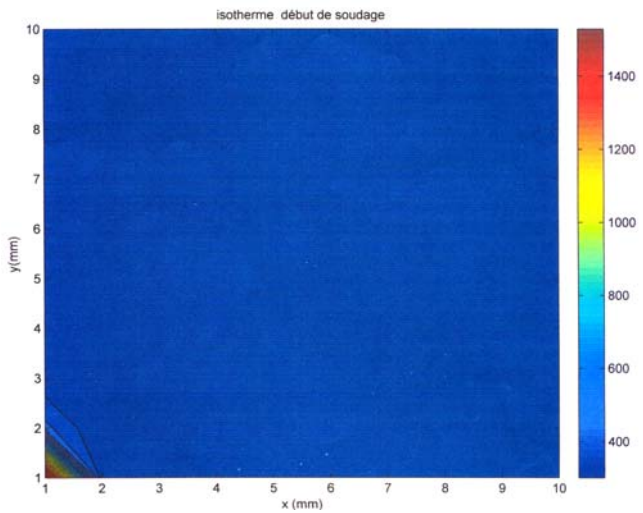


Figure 3 : Courbe de variation de température du soudage à  $t = 0.3$  seconde (début de soudage)

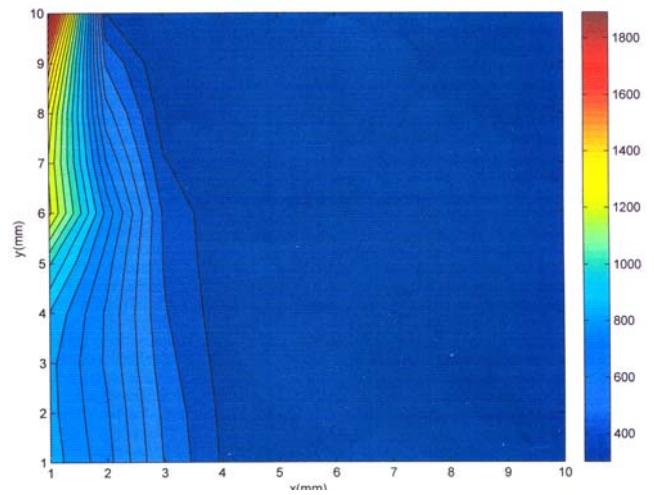


Figure 6 : Courbe de variation de température du soudage à  $t = 25$  secondes (fin de soudage).

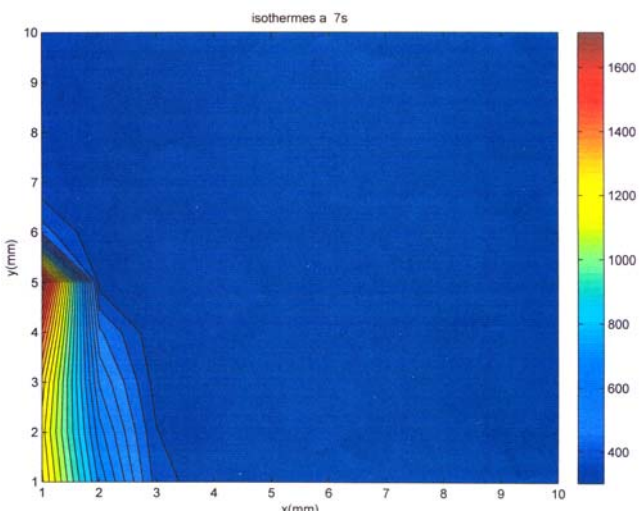


Figure 4 : Courbe de variation de température du soudage à  $t = 07$  secondes (milieu de soudage)

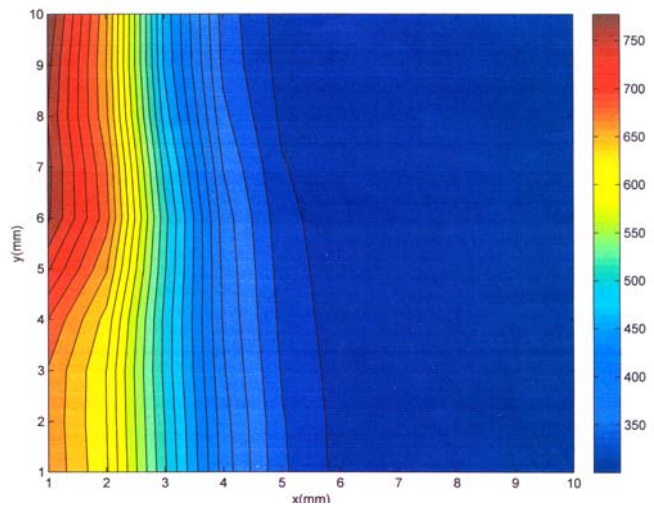


Figure 7 : Courbe de variation de température après le soudage.

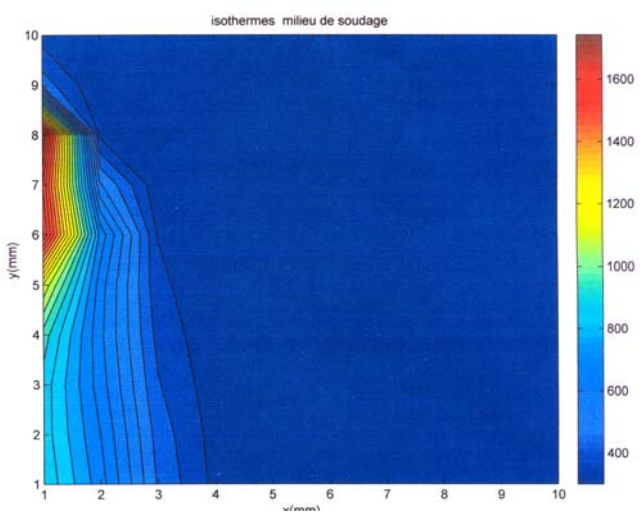


Figure 5 : Courbe de variation de température du soudage à  $t = 15$  secondes (milieu de soudage)

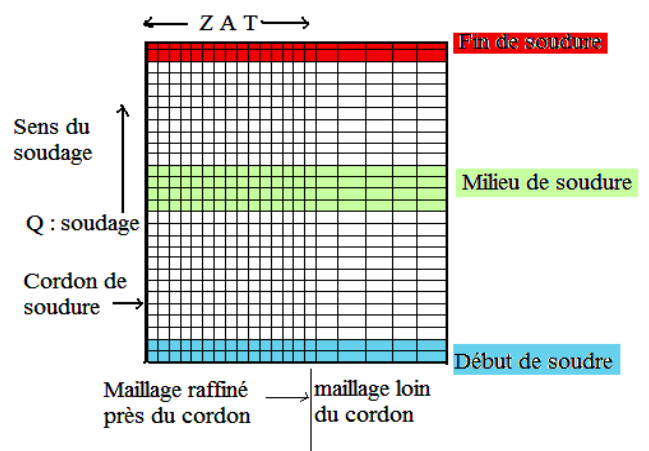


Figure 8 : maillage proposé pour la zone du soudage et son voisinage

$dx = 4,1 \text{ mm}$  suivant l'espace distance cordon,  $dt = 1$  seconde et  $dy = 5,3 \text{ cm}$  suivant le cordon

D'après l'étude numérique nous pouvons dire que la ZAT se délimite de part et d'autre du cordon dans une limite de valeur approximative de  $8,2 \text{ cm}$ .

## 5 PROCEDURE EXPERIMENTALE

Le test de micro dureté appliqué le long des deux pièces soudées Figure 13 à été réalisé sur un micro duromètre de marque AFFRI avec une charge d'1 Kg.

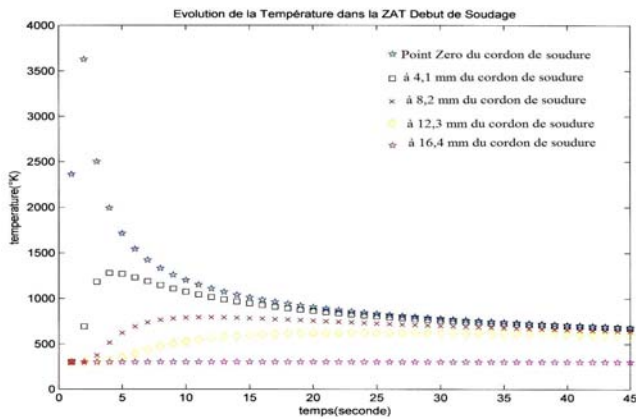


Figure 9 : Evolution de la température dans la ZAT au début de soudage.

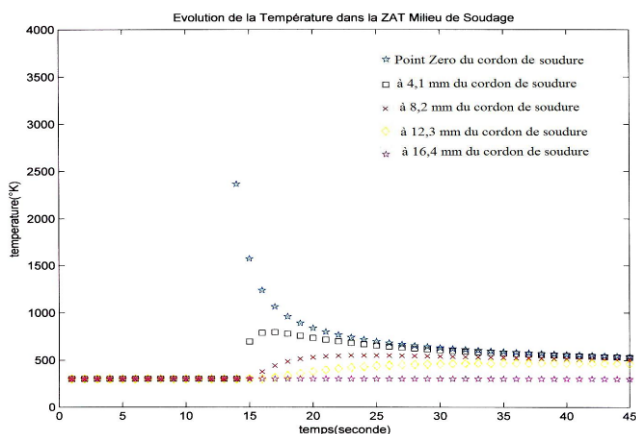


Figure 10 : Evolution de la température dans la ZAT au milieu de soudage.

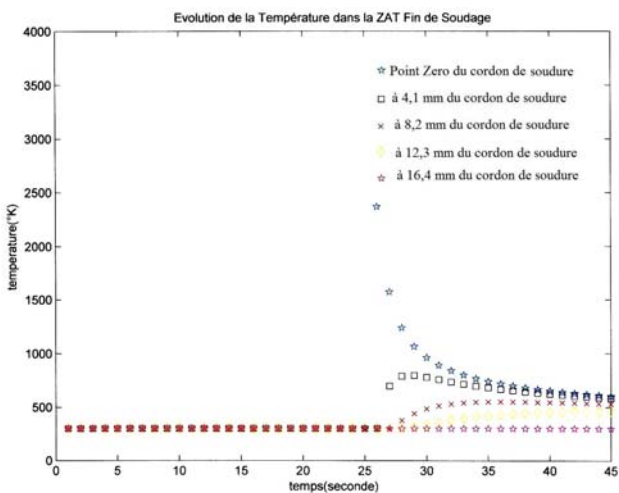


Figure 11 : Evolution de la température dans la ZAT en fin de soudage.

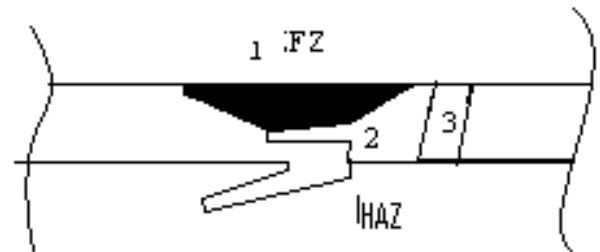


Figure 12: Différentes régions impliquées par le test de micro dureté des pièces soudées.

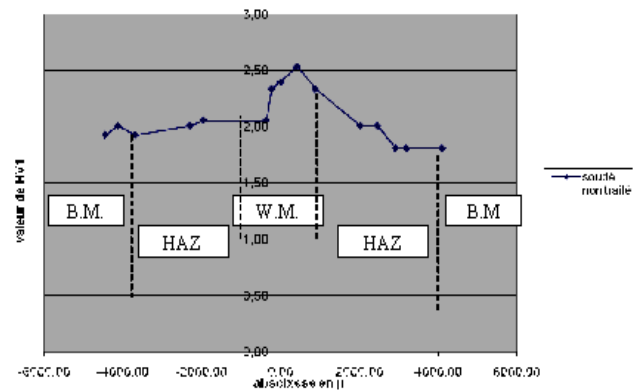


Figure 13: Valeur de micro dureté de la ZF et ZAT de l'élément soudé.

## 6 INTERPRETATION DES RESULTATS

Il a été reporté que le test de micro dureté donne une approche réelle sur le comportement des propriétés mécaniques de différentes zones du métal [14]. Dans d'autres travaux de recherche, c'est un moyen rapide pour l'obtention d'information sur ce métal [13]. Pour notre cas d'acier, la distribution des valeurs de micro dureté dans la ZAT montrée dans la figure 12 est en accord avec la littérature, Gul et al. [6] a trouvé que la valeur maximale de dureté se localise dans la zone ZF cela se confirme dans notre cas.

La variation du dureté de la zone soudée peut être attribué à plusieurs facteur telle que :

Les contraintes résiduelles après soudage, la grosseur des grains de la zone ZAT et ZF, la composition des phases et les inclusions métallique. D'après la courbe de la Figure 13 la largeur de la ZAT est approximativement égale  $8 \text{ cm}$ .

## 7 CONCLUSION

En grande partie l'étude entamée à pu nous donner une idée claire sur :

- La variation du flux de température du à la source de chaleur de soudage durant tout le temps de l'assemblage des deux embouts (supérieur et inférieur) de la bouteille de gaz.
- L'identification physique de la zone affectée thermiquement durant et après l'opération de soudage.
- Prédiction et localisation du comportement métallurgique et mécanique des différentes zones affectées par le soudage des deux éléments assemblés de la bouteille à gaz.
- Existence d'une variation de valeur physique des propriétés mécaniques et probablement aussi de la composition chimique des différentes zones de la ZAT.

## REFERENCES

- [1] Yaowu Shi , Dong Chen, Yongping Lei, Xiaoyan Li "HAZ microstructure simulation in welding of a ultra fine grain steel" Computational Materials Science 31 (2004) p 379–388
- [2] P.N. Sabapathy. M.A. Wahab and M.J. Painter "Numerical models of in-service welding of gas pipelines" Journal of Materials Processing Technology 118 (2001) p 14-18
- [3] B. Taljat, B. Radhakrishnan, T. Zacharia "Numerical analysis of GTA welding process with emphasis on post-solidification phase transformation effects on residual stresses" Materials Science and Engineering A246 (1998) p 45–54.
- [4] M. Abid, M. Siddique "Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint" International Journal of Pressure Vessels and Piping 82 (2005) p 860–87
- [5] E. Bayraktar, D. Kaplan, L. Devillers, J.P. Chevalier, Journal of Materials Processing Technology 189 (2007) 114-125.
- [6] A. Güral, B. Bostan, A.T. Özdemir, Materials and Design 28 (2007) 897-903.
- [7] M. Eroglu, M. Aksoy, Materials Science and Engineering A286 (2000) 289-297.
- [8] O. Grong, O.M. Akselsen, HAZ grain growth mechanism in welding of low carbon microalloyed steels. Acta Metall 1986, 34: 1807-15.
- [9] C. Thaulow, AJ Paauw, A Gunleiksrud, OJ Naess, Heat affected zone toughness of low carbon microalloyed steel. Metal Construct 1985, 17/94-9.
- [10] K. Ohaya, J. Kim, K. Yokoyama, M. Nagumo, Microstructures relevant to brittle fracture initiation at the heat-affected zone of weldment of low carbon steel. Metal Mater Trans A 1996; 27:2574-82.
- [11] Olabi AG, Hashmi MJS. The microstructure and mechanical properties of low carbon steel welded components after the application of PWHT. J Mater Process Technol 1996;56:88-97.
- [12] S.A.A. Akbari Mousavi, R. Miresmaeili "Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel" journal of materials processing technology (2008).
- [13] S. Lars-Eric, Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds, Library of Congress Cataloging-in-Published Data, 1994.
- [14] G.R. Stewart, A.M. Elwazri, R. Varano, N. Pokutyłowicz, S. Yue and J.J. Jonas, Materials Science and Engineering A420 ( 2006.) 115-12