
Soumis le : 13 Avril 2015

Forme révisée acceptée le : 15 Mai.2015

Email de l'auteur correspondant :

hadjmeliani@yahoo.fr/hadjmeliani@univ-chlef.dz

Nature & Technology

Qualification d'un Acier API 5L X70 : Etude Expérimentale et Validation Numérique

¹O. Bouledroua, ¹M. Ouled Mbereick, ^{1,2}M. Hadj Meliani

¹ LPTPM, FSSI, Hassiba Ben Bouali University of Chlef, Esalem City, 02000, Chlef, Algeria.

² Laboratoire de Fiabilité Mécanique, LFM-ENIM, île de saulcy 57045, Université Paul Verlaine de Metz, France.

Abstract

In this paper API 5L X70 steel is characterized experimentally by mechanical tests. Tension tests, microstructure, hardness and resilience and finally bending tests are performed. A finite element validation study using ANSYS calculation code is presented in the case of bending in order to validate the constitutive equation.

Keywords: X70 steel, Ansys code, Folding, Numerical Simulation.

Résumé:

Dans cette étude on caractérise un acier API 5L X70 par des essais mécaniques de contrôle destructifs. Des essais de traction, d'analyse de la microstructure, de dureté, de résilience et enfin menés. Une étude de validation par éléments finis en utilisant un code de calcul ANSYS est présentée dans le cas de pliage afin de valider les lois de comportements.

Mots clés: Acier X70, ANSYS, Pliage, Simulation numérique.

1. Introduction

ALFA PIPE ex ALFATUS est une entreprise spécialisée dans la fabrication des tubes pour canalisation d'hydrocarbures et hydrauliques. Elle dispose d'un système de contrôle qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales API et ISO 9001-2008. ALFA PIPE a pour rôle de produire des tubes soudés en spirale à partir des bobines de tôles. La gamme de tubes fabriqués varie en diamètre entre 16 pouces (406.4 mm), et 52 pouces (1320.8 mm). Actuellement, la plupart des commandes concerne des tubes 48 pouces (1219.2 mm) et de longueur entre 9 à 12 m. Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150. La production des canalisations soudées est soumise à plusieurs exigences. Conformément aux spécifications, les tubes sont fabriqués par soudage automatique à l'arc immergé à partir de feuillards. Le métal devra être de bonne qualité notamment en ce qui concerne sa résistance au vieillissement. La qualité du matériau importé sous forme de bobine est vérifiée dans un laboratoire qualifié [1]. Dans ce travail, on analyse la qualification de l'acier grade API5LX70, fournie par une société Allemande et sa soudabilité réalisée par

l'entreprise ALFAPIPE par vérifications et validations numériques d'essais de pliage.

2. Essais utilisés pour la caractérisation

Les méthodes expérimentales sont axées sur une caractérisation du comportement mécanique et à la rupture de l'acier API 5L X70 utilisé dans le transport du gaz. Nous avons commencé par une étude générale des propriétés mécaniques et microstructurales de cet acier, suivie d'une description des éprouvettes et du dispositif expérimental ayant permis de mener des essais sur des éprouvettes normalisées de traction. Une étude de résilience et de dureté a été aussi faite. Enfin, des essais de pliage, suivant différents chargements, est présenté avec une validation numérique.

2.1 Détermination de la loi de comportement mécanique

Le matériau de notre étude est un acier au carbone-manganèse utilisé pour le transport des hydrocarbures sous une pression de service de 70 bars de dénomination API-X70, est répond à la spécification imposée par la norme

API5L. Le tableau 1 représente la composition chimique de l'acier utilisé. La composition telle qu'elle ressort des analyses sur coulée est conforme aux exigences de la norme indiquées au tableau 2.

Tableau 1. Composition chimique de l'acier grade API X70.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
%	0.125	1.680	0.270	0.051	0.040	0.021
X70	S	Cu	Ti	Nb	Al	p
	0.005	0.045	0.003	0.033	0.038	0.012

Tableau 2. Exigence de la composition chimique pour analyses nuance X70 [2].

	C	Mn	Si	Ni	Mo	S	Cu
Min	0.050	1.000	0.150	-	-	-	-
Max	0.140	1.700	0.350	0.250	0.250	0.005	0.080
	V	Nb	Al	P	Cu	V	
Min	-	-	0.010	-	-	-	-
Max	0.080	0.040	0.040	0.020	0.080	0.080	

Dans le but de déterminer les courbes charge-déformation et les propriétés mécaniques de l'acier X70, des éprouvettes plates selon, la norme française NF EN 10002-1 [3], ont été utilisés en traction simple à température ambiante dans la machine Mohr (ZAWICK) du laboratoire ALFAPIPE. Le matériau initial se présente sous la forme de bobines de la même coulée (Figure 1-a). L'épaisseur des éprouvettes $e=14.7\text{mm}$, la largeur $b=50\text{mm}$, la longueur est $L_1=400\text{mm}$ et la longueur de la partie calibrée $L_2=100\text{mm}$, avec un rayon de courbure $r=25.4\text{mm}$ (figure 1-d).

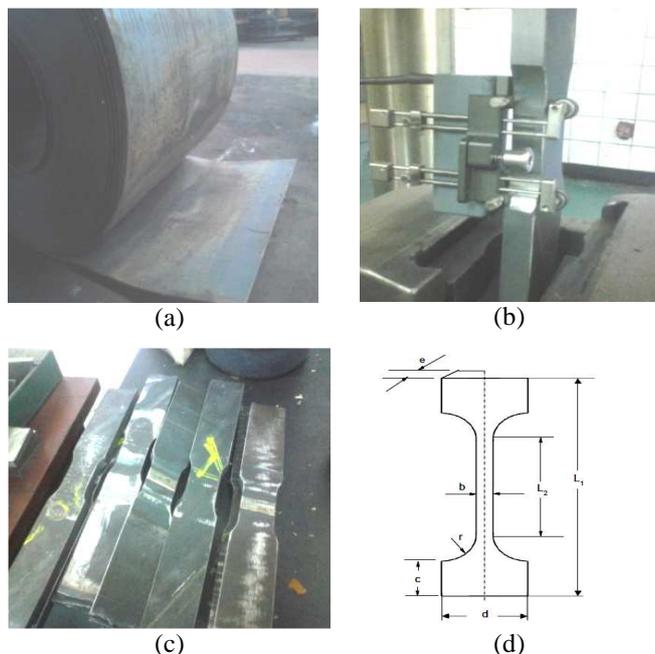


Figure 1 : (a) bobine et (b) la virole, (c) éprouvette avec extensomètre de traction et (d) dimensions suivant la norme EN 10002-1 [3].

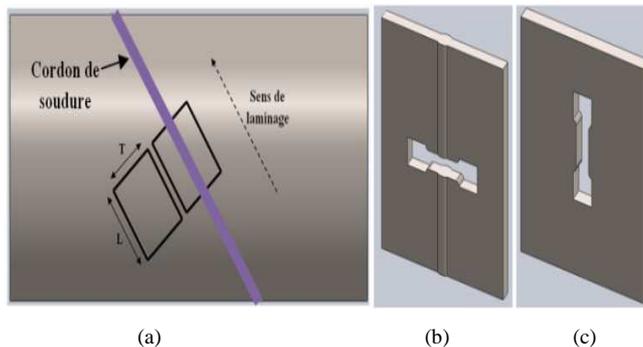


FIGURE. 2 : (a) Emplacement des prélèvements des éprouvettes dans le tuyau. (b) Eprouvette de traction MB. (c) Eprouvette de traction de la soudure.

Le prélèvement et le découpage des éprouvettes ont été fait dans le sens du laminage (L) de la bobine, tel que représenté dans la figure 2.(a) et 2.(b). Le tableau 3 et la figure 3 présentent les résultats de traction conventionnelle et rationnelle de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation du matériau. L'allure générale de cette courbe a mis en évidence un comportement ductile.

Tableau 3. Propriétés mécaniques de l'acier grade API X70.

E (MPa)	ν	$\sigma_{E\ 0.2}$ (MPa)	σ_U (MPa)	A %	k	n
$2,22 \cdot 10^5$	0,3	483,03	673,14	40.55	855,70	0.094

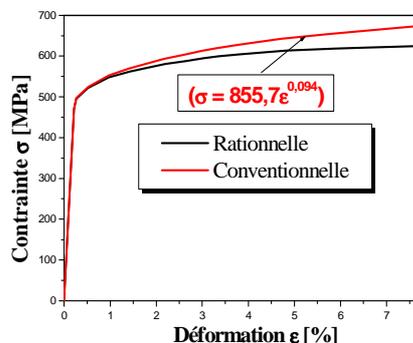


FIGURE. 3 : Courbes de traction nominale et vraie.

Les propriétés mécaniques de résistance à la traction seront conformes aux exigences du tableau 3 avec E le module de Young, ν le coefficient de Poisson, $\sigma_{E\ 0.2}$ la limite élastique selon la norme, σ_U la contrainte ultime, A % l'allongement à la rupture, et k et n étant les paramètres de Hollomon. Les rapports de la limite élastique à la charge de rupture pour chaque éprouvette d'essai ne devront pas excéder 0.85.

Tableau 4 : Propriétés mécaniques limite selon les exigences des clients [2].

Nuance	$\sigma_{E\ 0.2}$ (mini)	σ_U (mini)	E/R (maxi)	A% (mini)
X70	482,65	565,056	0.85	18 %

Les éprouvettes d'essai de traction sur soudure sont prélevées de sorte que l'axe de traction est à 90° de la direction de la soudure (figure 2-a et 2-c), celle-ci se trouve située au centre de l'éprouvette d'essai. Ces éprouvettes ont des épaisseurs égales à l'épaisseur totale du tube. La soudure n'est pas arasée. Les éprouvettes redressées à froid ont été exécutées conformément aux indications de la norme EN 10002-1 [3].

2.2 Microstructure de l'acier X70

La microstructure des aciers a été étudiée à l'aide des microscopies optique et électronique. Les surfaces observées ont été polies jusqu'à 1µm, nettoyées à l'acétone et séchées. La présence d'inclusions, non métalliques, pouvaient être observée directement sur les surfaces polies. Pour visualiser les différentes phases de la microstructure, une attaque chimique ou électrochimique a été effectuée. Les aciers au carbone ont été attaqués par le nital (4% solution de HNO₃ dans l'éthanol) pendant quelques secondes. Après cette attaque, la ferrite apparaît au microscope optique comme une phase blanche, la perlite est plus foncée alors qu'au microscope électronique à balayage (MEB), les grains de ferrite sont foncés et la perlite est claire. Les données disponibles sur l'acier X70 dans les publications récentes montrent qu'il existe un large spectre d'aciers répondant aux critères de composition prévus pour cette désignation. Il convient donc d'identifier plus en détail les paramètres caractérisant l'acier dont nous avons obtenus les échantillons. Une section dans le plan perpendiculaire à l'axe du tube, nous a permis d'observer la microstructure qui se compose essentiellement de grains de ferrite polygonale (blanc) et de perlite (en foncé) organisés en bandes. Ce type de microstructure est engendré par la ségrégation des éléments Mn et P lors du laminage, elle est très courante pour les aciers X70 [4-5].

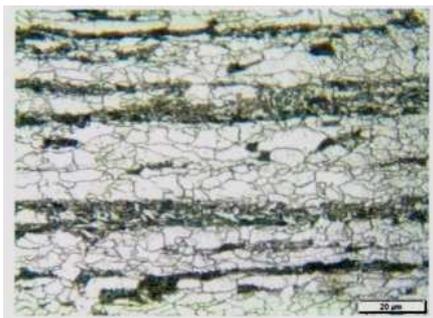


Figure. 4 : Micrographie dans une section transversale du tuyau X70-Grossissement 500 (E₂).

2.3 Essais de résilience et de dureté

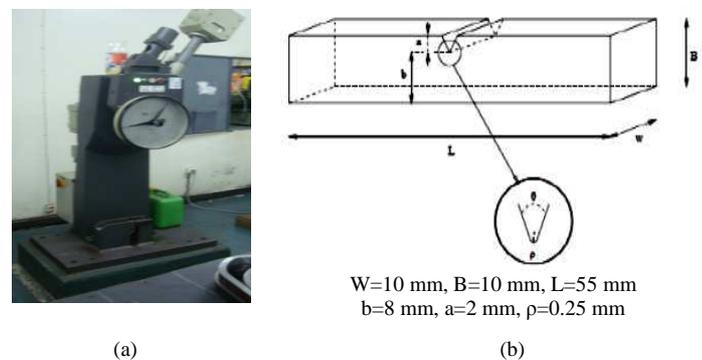
Les caractérisations mécaniques déduites de l'essai de traction peuvent être insuffisante car des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières rendant le matériau à l'état fragile. L'essai de résilience est un complément essentiel de l'essai de traction. L'essai de flexion par choc, nommé aussi de

résilience, sur éprouvette entaillée Charpy a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture brutale (pour plus de détails voir [6,7]).

Ces essais ont été effectués sur un mouton Charpy V (figure 5) dont la capacité maximale est de 300J. Nous avons effectué des essais à la température ambiante au laboratoire d'ALFAPIPE. Douze (12) éprouvettes ont été préparées : trois éprouvettes usinés a partir de métal de base (MB), trois autres present au niveau du cordant de soudure (MD) et les six dernières éprouvettes prélevées dans la zone affecté thermiquement (ZAT) (Voir la Figure 6). Les dimensions de l'éprouvette sont données dans la Figure 5 ainsi que la photographie du pendule de Charpy.

La variation d'énergie de rupture (Energie absorbé par l'éprouvette) dans les trois zones est très importante, la valeur moyenne la plus importante est obtenue dans la zone ZAT, suivi de celle du métal de base puis de celle du métal d'apport. Pour les essais de dureté, une plaque rectangulaire a été extraite dans l'état final dans le sens de laminage (L), (figure 8.a).

Dans cette partie, la variation de la dureté dans les trois zones (MB, ZAT, MD) a été mesurée avec la machine (ZAWICK) Z HV10 (Figure 9), étalonnée et certifiée, du laboratoire ALFA PIPE. La machine est assistée par ordinateur, et permet de tracer la filiation de la dureté. Les charges appliquées varies dans la plage: charge maximale 10 Kg et charge minimale 200g.



Figures. 5: a) Mouton Charpy (Alpha-Pipe, Annaba) (b) éprouvette Charpy V selon la norme EN 10045-1 [8].

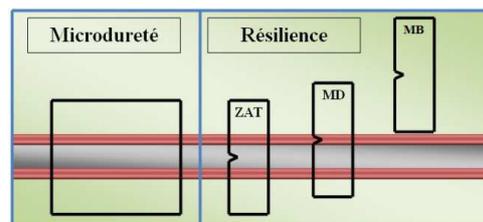


Figure. 6: Configuration des éprouvettes des résiliences et de micro dureté.



Figure 7 : Eprouvette de résilience en état final.

Tableau 5. Les résultats de l'essai de résilience pour chaque zone.

Zone	Epr 1	Epr 2	Epr 3	$E_{Moyenne}$ (Joules)
MB	220	215	214	216.33
MD	180	140	206	175.33
TAT	241.5	240	243.08	242.16

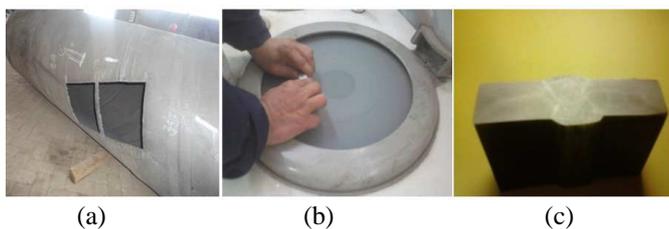


Figure 8 : Préparation de l'échantillon. (a) rectification (b) attaque chimique et (c) état finale des éprouvettes.



Figure 9 : Procédure et machine de dureté (Type Vickers).

Les indentations (1, 2, 3, 14, 15, 16) sont appliquées dans le métal de base (MB). Les indentations (7, 8, 9, 10) sont appliqués sur la soudure ou dans le métal d'apport (MD). Les indentations (4, 5, 6, 11, 12, 13) sont appliqués dans la zone de transition ou bien dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

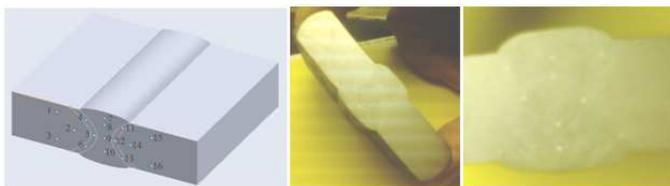


Figure 10 : positionnements des indentations selon la norme NF EN ISO 9002 [9].

Tableau 06. Résultats d'essai HV (les unités sont en Kg/mm^2).

Zone	MB						MD				ZAT					
Points	1	2	3	14	15	16	7	8	9	10	4	5	6	11	12	13
DV	219	218	215	215	219	217	224	219	221	222	229	234	230	235	233	232
Moyenne	217,16						221,5				232,16					

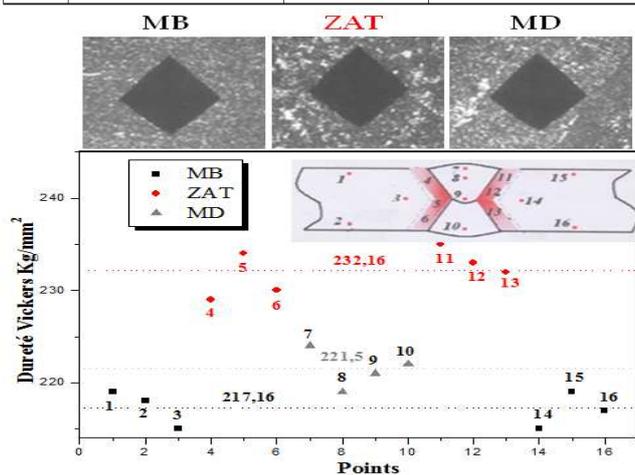
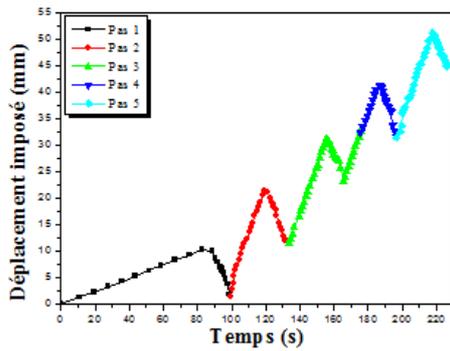


Figure 11 : Variation de dureté Vickers dans les trois zones.

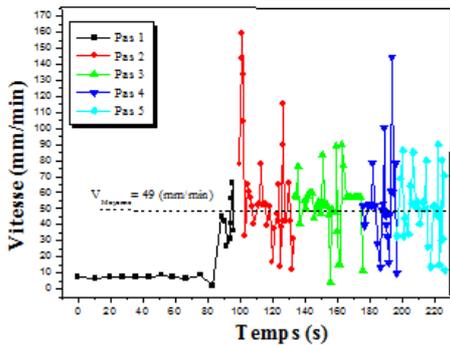
Les valeurs de micro dureté de ce tube sont acceptables et ne présentent aucune anomalie. Elles sont conformes aux exigences de la norme API. Les filiations de micro dureté ont montré une bonne fluctuation tout au long de l'assemblage soudé (métal de base, cordon et zone affectée thermiquement) pour le tube étudié. Les résultats de micro dureté des indentations 7, 8 et 9, 10 relatives au cordon de soudure ont montré une uniformité des valeurs entre le métal de base et le cordon de soudure, signe d'un soudage correct. Nous avons remarqué que les zones 4, 5, 6, 11, 12, 13 correspondent à une dureté très élevée. Ces zones sont donc les plus fragiles et risquent d'être soumises à rupture.

2.4 Essais de pliage et validation numérique

L'essai de pliage consiste à solliciter en flexion une éprouvette de section carrée. Généralement, cet essai est réalisé avec contrôle visuel, pour une grande déformation jusqu'à atteindre un angle de pliage spécifique. Nous avons fait deux essais de pliage sur la machine Mohr fedehaf (Zwick-Roller) (Figure 13.c), dans le but de déterminer les graphes de force-pénétration. Premièrement, on a préparé deux éprouvettes plates rectangulaires de la même coulée de longueur $L_p=350$ mm, de largeur $D_p=30$ mm et d'épaisseur $e_p=14.7$ mm.



(a)



(b)

Figure 12 : Condition d'essai (a) Variation du déplacement imposé. (b) Variation de vitesse de déplacement en fonction de temps.

Pendant l'essai de pliage, la courbe Force-Déplacement expérimentale a été tracée pour cinq pas de déplacement. Pour chaque pas on enregistre charge et décharge avec un pas de déplacement presque constant (Figure 12). La vitesse est pas constante, avec une valeur moyenne $V_{moy}=49$ mm/min, La machine hydraulique qui donne un changement de la vitesse présenté dans la Figure 12(b).

Une validation des résultats expérimentaux a été prise en compte par une modélisation numérique. Les calculs numériques ont été effectués en deux dimensions en déformations planes, en utilisant le code de calcul ANSYS APDL, basé sur un développement par éléments finis. Parmi la variété des éléments disponibles dans la bibliothèque d'ANSYS [10], l'élément PLANE183 est conçu pour modéliser les géométries en 2D (Figure 15). Les éléments de contact CONTA172 et l'élément cible TARGE169 sont utilisés pour assurer un contact sans friction ($\mu = 0$).

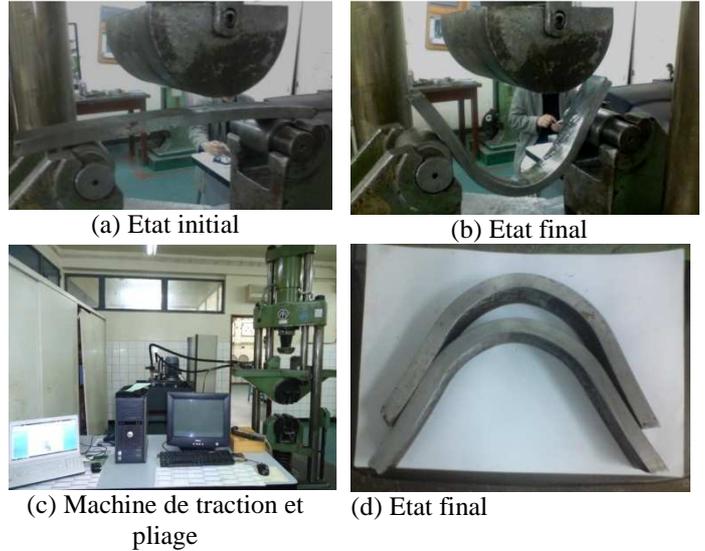
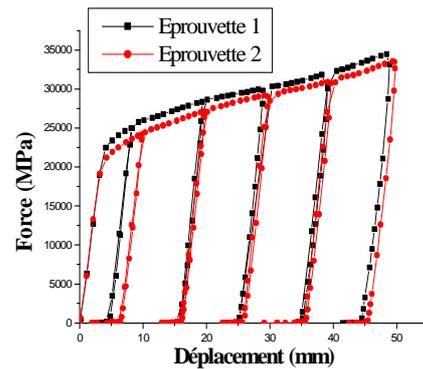
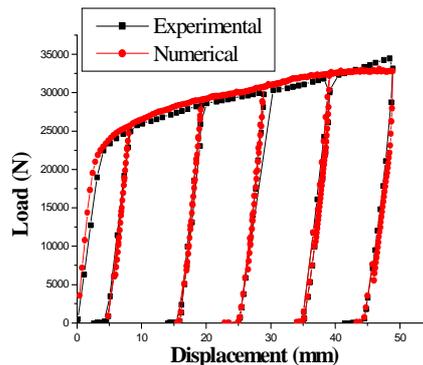


Figure. 13 : Etapes de l'essai de pliage de deux échantillons.

La Figure 14.(a) représente la courbe expérimentale des deux essais de pliage avec cinq pas.



(a)



(b)

Figure 14 : Résultats expérimentaux de pliage (a) pour deux éprouvettes - (b) validation numérique.

En raison de la symétrie de notre structure, la moitié de l'éprouvette est modélisée avec les conditions aux limites présentées dans la Figure 15.

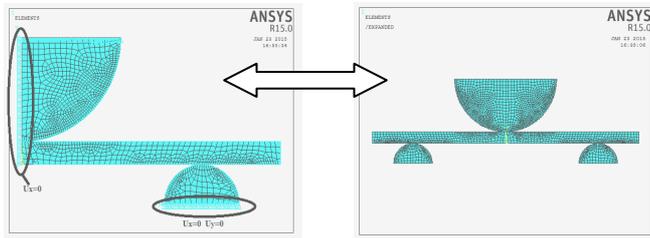


Figure 15 : Conditions aux limites.

La Figure 16 représente la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises, pour les deux stades initial et final.

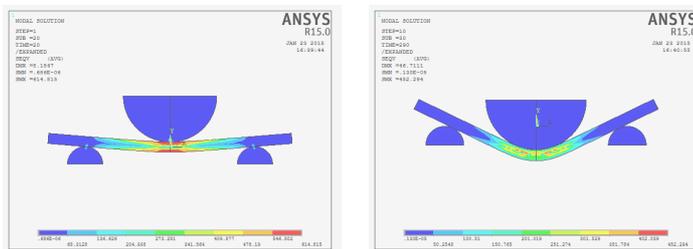


Figure.16. Contraintes Von Mises après deux pas stades initial et final.

3. Conclusion

Les caractérisations mécaniques de l'acier API 5L X70 selon l'exigence des clients sont présentées. Les différents essais de comportement en traction, la microstructure, la dureté, la résilience et la résistance au pliage montrent que les propriétés mécaniques sont convenables pour l'utilisation dans le transport des hydrocarbures. Les résultats expérimentaux sont en bonne accords avec les normes internationales. La simulation numérique confirme la loi du comportement de notre acier X70 en pliage par validation des différents résultats expérimentaux.

4. Références

- [1] S. Bouchouche, M. Mokhtar, "formation sur perfectionnement des essais mecanique," csc expertise-annaba, 2012.
- [2] AlfaPipe Tuberie de Annaba, Département assurance qualité, Ordre d'exécute fabrication et contrôle, 2012.
- [3] NF A 03-001, NF EN 10002-1, "Essai de traction, partie 1 : Méthode d'essai (à la température ambiante)," Association française de normalisation afnor, 1990.
- [4] F. Carboni, A. Pigani, G. Megahed, S.K. Paul, "The development of new steel grades and products," Casting and rolling of api x70 grades for arctic applications in a thin slab rolling plant. Buenos aires 2008.
- [5] P. T. Bulger AE B. T. Lu Ae J. L. Luo "microstructural effect on neur6neutral ph stress corrosion cracking resistance of pipeline steels," J Master SCI (2006) 41:5001-5005–doi 10.1007/s10853-006-0131-7.
- [6] K. Kofiani et al. "New calibration method for high and low triaxiality and validation on sent specimens of api x70", Sciencedirect, International journal of pressure vessels and piping, 2013.
- [7] B. Bourdilliau et al. Comparative study on charpy specimen reconstitution techniques. Nuclear engineering and design, Sciencedirect, 2011.
- [8] NF EN 10045-1. Essai de flexion par choc sur éprouvette charpy. Partie 1: Méthode d'essai, association française de normalisation," Afnor, 1990.
- [9] NF EN ISO 9002, "Système qualité. Modèle pour l'assurance de la qualité en production", installation et prestations associées - 1994.
- [10] Ansys manuels. (2013). Ansys inc. <http://www.ansys.com/>