

Détermination des déformations résiduelles dans les tubes HDPE-100 par la méthode d'enlèvement de couches

Hana FADDA¹, Mounia KADDECHE², Nacera HAMLAOUI², Kamel CHAOUI¹

¹) Laboratoire de Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle (LR3MI), Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba 23000, Algérie.

²) Laboratoire de Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle (LR3MI), Département de Génie Mécanique, Faculté de Technologie, Université 8 Mai 1945, BP 401, Guelma 24000, Algérie.

Abstract —: This study provides an approach for determining circumferential residual strains and mechanical properties in a high-density polyethylene pipe. The method is based on the preparation of cylindrical envelopes of specific dimensions by machining and the measurement of the obtained deformations as a function of time, after cutting the rings in the longitudinal direction. In order to identify the impact of these residual strains, tensile tests are performed on standard specimens extracted from the pipe wall in L and T directions. The results indicate an evolution of displacements caused by the liberation of internal residual stresses. The calculated stresses are highly compressive on external layers. The mechanical properties measured on the internal layers are largely higher than those of external layers which indicates a difference in morphologies between outer and inner pipe layers imparted by the extrusion process.

Keywords: HDPE-100/ Pipe/ Machining/ Residual strain/ Residual stress/ Mechanical properties/ L and T directions/

Résumé —: Cette étude présente une approche pour déterminer les déformations résiduelles circonférentielles dans un tube en polyéthylène de haute densité ainsi que les propriétés mécaniques après extrusion. La méthode est basée sur la préparation d'enveloppes cylindriques de dimensions spécifiques par usinage et la mesure des déformations obtenues dans le temps après sectionnement des viroles dans le sens longitudinal. Dans le but d'identifier l'influence de déformations résiduelles, des essais de traction sur des éprouvettes normalisées, extraites des parois du tube dans les directions L et T, ont été réalisés. Les résultats indiquent une évolution des déplacements causés par la libération des contraintes résiduelles. Ces contraintes calculées sont fortement compressives sur les couches externes du tube. Les propriétés mesurées sur les couches internes sont nettement supérieures comparées à celles des couches externes indiquant une différence morphologique importante impartie par l'extrusion.

Mots clefs : HDPE-100/ Tube/ Usinage/ Déformation résiduelle/ Contrainte résiduelle/ Propriétés mécaniques/ Directions L et T/

Nomenclature :

CE : couche externe,
CI : couche interne,
DL : direction longitudinale,
DT : direction transversale,
 D_{intern} : diamètre de la couche médiane (intermédiaire) [mm],
 $D_{0\text{ moy}}$: diamètre moyen après découpage [mm],
 D_0 : diamètre intermédiaire initial avant découpage [mm],
 $D(t)$: diamètre intermédiaire après découpage au temps t [mm],
E : module d'élasticité [$N.mm^{-2}$],

e_0 : épaisseur initiale de l'éprouvette [mm],
 e_{moy} : épaisseur moyenne [mm],
 $E(t)$: module de fluage au temps t , [$N.mm^{-2}$], [MPa]
RA : anneau alésé,
RC : anneau charioté,
 t : temps [h].

Lettres grecques

ν : ratio de Poisson,
 σ_y : contrainte de seuil d'écoulement [$N.mm^{-2}$], [MPa]
 $\sigma_{\theta\theta, Max}$: contrainte circonférentielle maximale [$N.mm^{-2}$], [MPa]
 σ_{ZZ} : contrainte axiale [$N.mm^{-2}$], [MPa].

1. INTRODUCTION

En Algérie, les tubes en HDPE sont couramment installés dans les agglomérations pour des raisons économiques et de maintenance par rapport aux tubes métalliques. Les expériences d'installations de tubes non métalliques ont montré des avantages techniques sur des aspects de sûreté de fonctionnement et de durée de vie des ouvrages ayant des propriétés mécaniques très intéressantes et pouvant donner des limites de vie allant à plus de 50 ans [1,2]. Cependant, il est nécessaire de connaître la distribution des caractéristiques mécaniques à travers la paroi d'un tube et comment la structure intrinsèque du polymère lui confère la résistance à la dégradation et au vieillissement [3-5]. En conséquence, la distribution des contraintes résiduelles (internes) dans un tube en matière plastique, supposé isotrope, est une caractéristique inhérente du processus de fabrication par extrusion qui est généralement suivi d'un refroidissement rapide. Cet état est d'une importance étendue sur le comportement et dans le diagnostic d'échec des tubes en plastique dans les réseaux urbains où l'agressivité des sols est augmentée [6]. La production de tubes en HDPE se fait généralement par extrusion à travers une forme qui donne le profil de l'outil, ce qui provoque des orientations différentes des chaînes de polymères et crée un gradient morphologique entre les couches internes et externes du tube [7]. De plus, le gradient de température en développement dans la paroi au cours de la phase de refroidissement et solidification, qui progresse de l'extérieur vers l'intérieur, provoque une contraction volumétrique inégale et conduit à la formation d'un profil de morphologie distinct se traduisant par des cristallinités dissemblables [8,9]. Dans cette étude, des mesures des déformations résiduelles, sur des tubes en HDPE de grands diamètres, sont présentées et les effets sur le comportement mécaniques sont abordés dans les directions longitudinale et transverse.

2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

2.1 Déformations et contraintes résiduelles :

Des éprouvettes de forme annulaire (virole) sont découpées suivant une génératrice comportant les parois externe et interne. La procédure de préparation a été développée au laboratoire d'usinage de l'Université de Guelma (chariotage et alésage) avec des paramètres adaptés pour le polyéthylène afin d'éviter les surchauffes et incertitudes dimensionnelles sur les éprouvettes (fig. 1).

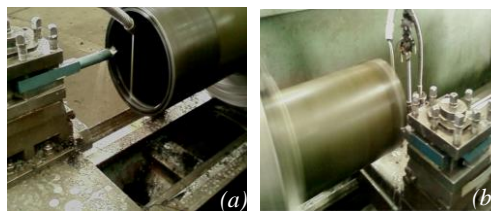


Figure 1 : Tube HDPE-100 ; (a) alésage, (b) chariotage.

Le Tableau 1 résume les valeurs des épaisseurs moyennes des enveloppes utilisées pour les mesures des déformations résiduelles, et pour préparer par la suite, les éprouvettes standards d'essai mécaniques. Ces dernières sont confectionnées séparément car ayant des épaisseurs identiques et sont représentatives seulement des couches externe et interne avec une épaisseur moyenne de 3 mm.

Tableau 1 : Types et dimensions des éprouvettes étudiées.

Virole	Eprouvette	e_{moy} [mm] ; $\pm 0,10$
Externe	1-CE	3.11
	2-CE	4.97
	3-CE	5.09
Interne	1-CI	3.38
	2-CI	4.40
	3-CI	4.81

Il est difficile dans les conditions actuelles d'usinage de ce type de matériau d'obtenir des valeurs d'épaisseur avec une grande précision vu le ramollissement rapide de la résine au-delà de 50°C. Plusieurs méthodes ont été adoptées pour la mesure des déformations (empreintes, photos avec échelles associées à l'agrandissement, vérifications par les calculs, calcul d'erreurs...). Le sectionnement des viroles a été fait après 10 jours de la préparation par une fraiseuse ouvrant la voie pour les mesures des déformations.

2.2 Propriétés mécaniques :

La figure 2 présente les éprouvettes standards préparées selon ISO 527 et testées en accord avec ASTM D 638 Type 4, dans les directions longitudinale et transverse.

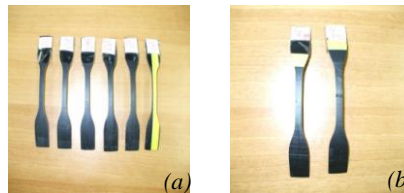


Figure 2 : Eprouvettes HDPE-100 d'essais de traction uniaxiale : (a) longitudinales et (b) transversales.

La courbure observée indique la relaxation des déformations après préparation et lors de l'essai de traction, une précharge de l'ordre de 1 N a été appliquée pour rendre les éprouvettes quasi droites. Les éprouvettes ont été soumises à la traction monotone sur une machine d'essai universelle Type Zwick 1120, particulièrement conçue pour la caractérisation des polymères avec une cellule de charge maximale de 2 kN. Une vitesse d'essai de 50 mm/min a été adoptée. Le déroulement des essais a été contrôlé par le logiciel TestXpert® Version 9.01 qui a permis de les effectuer exactement de la même manière à température ambiante [10].

3. RESULTATS

3.1 Profil des déformations résiduelles :

L'ouverture ou la fermeture de l'anneau tubulaire dans le sens circonférentiel après découpage suivant une même génératrice, libère le réarrangement de la forme initiale du tube [8, 10,11]. Ceci se traduit par un changement de diamètre (positif ou négatif) et même par des variations de forme (très faibles) dans le sens longitudinal. Ces changements de forme sont liés aux contraintes circonférentielles ($\sigma_{\theta\theta}$) mais aussi aux contraintes axiales (σ_{zz}) (fig. 3). Nous avons considéré dans cette étude que l'effet de la contrainte longitudinale est négligeable vu les valeurs faibles des déformations observées et la longueur des viroles.



Figure 3 : Relaxation des contraintes après une même période de relaxation.

À partir des valeurs mesurées expérimentalement des chevauchements, nous avons calculé les diamètres intermédiaires dans les 2 cas (ouverture ou fermeture de la virole) par la relation suivante :

$$D_{Interm} = D_{0moy} - e_{moy} \quad (1)$$

Les résultats obtenus sont indiqués en termes de déplacements (fig. 4). La présence de la couche externe a considérablement réduit le diamètre de la virole pour toutes les épaisseurs (éprouvettes 1-CE, 2-CE et 3-CE). Ceci se traduit par des déformations importantes en faisant abstraction du signe car il y a réduction ou augmentation de diamètre suivant les cas (figs. 3 et 4). Plus l'épaisseur est petite, c'est-à-dire que l'effet de la couche interne ou externe est plus important, plus la vitesse de déformation est importante (éprouvettes 1-CE et 1-CI).

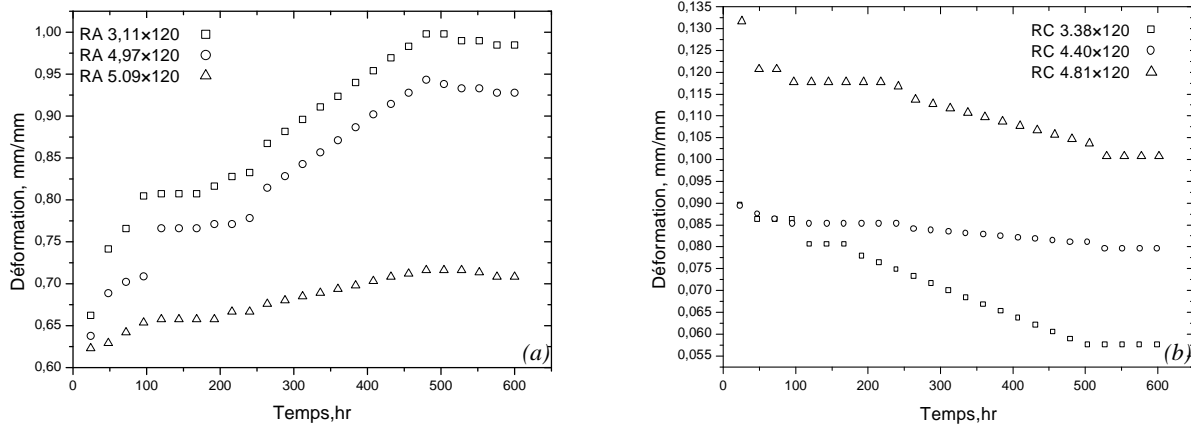


Figure 4 : Variation de déplacements circonférentiels en fonction du temps écoulé ; (a) CE, (b) CI.

Les valeurs des déformations sont comprises entre 0,05 et 0,14 mm/mm. Les contraintes résiduelles sont calculées en utilisant la relation (équ. 2) développée par Broutman et al. [11] :

$$\sigma_{\theta\theta Max} = \pm \frac{E(t) e_0}{1 - \nu} \left(\frac{D_i(t) - D_0}{D_i(t) \cdot D_0} \right) \quad (2)$$

Les résultats obtenus sont illustrés dans la (fig. 5) et ils indiquent que la couche externe est soumise à des contraintes circonférentielles compressives allant jusqu'à 14,59 MPa à environ 1 mm de la surface externe du tube. Par contre, des valeurs se rapprochant de zéro ou parfois positives ont été notées pour les viroles chariotées. Il est important de dire que les valeurs utilisées de E(t) ont été prises de la littérature disponible [8,11]. Dans d'autres études, la distribution des contraintes résiduelles est clairement affichée avec des valeurs positives et négatives [8,11]. Nous ne savons pas exactement comment ce tube a été produit et conditionné car il a été gracieusement fourni par l'Entreprise Nationale Sonelgaz de Annaba. Mais, il est possible que le refroidissement ait été opéré en même temps de l'extérieur et de l'intérieur. Ceci est possible et même améliore la résistance à la propagation de fissures de l'intérieur du tube.

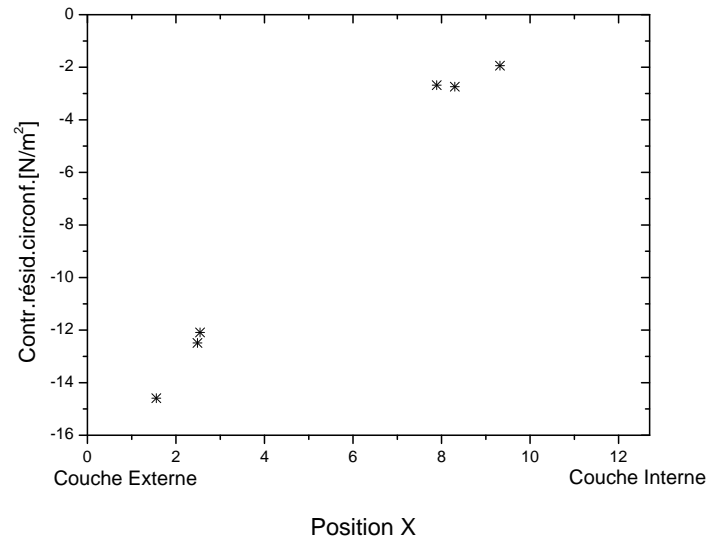


Figure 5 : Distribution des contraintes résiduelles à travers les parois du tube HDPE 100.

Ceci reste à vérifier, auquel cas la distribution va comporter une zone entre 5 et 8 mm d'épaisseur qui peut avoir des valeurs positives (contraintes résiduelles de traction). La technique pour y accéder expérimentalement par enlèvement de couche est encore plus difficile à réaliser car il faut combiner le chariotage et l'alésage sur une même longueur d'éprouvette de HDPE ce qui augmentera le coût de préparation des différents mandrins en bois et cylindres métalliques à confectionner.

3.2 Comportement mécanique :

Les figures 6 et 7 illustrent les comportements mécaniques des éprouvettes externes et internes dans les directions DT et DL.

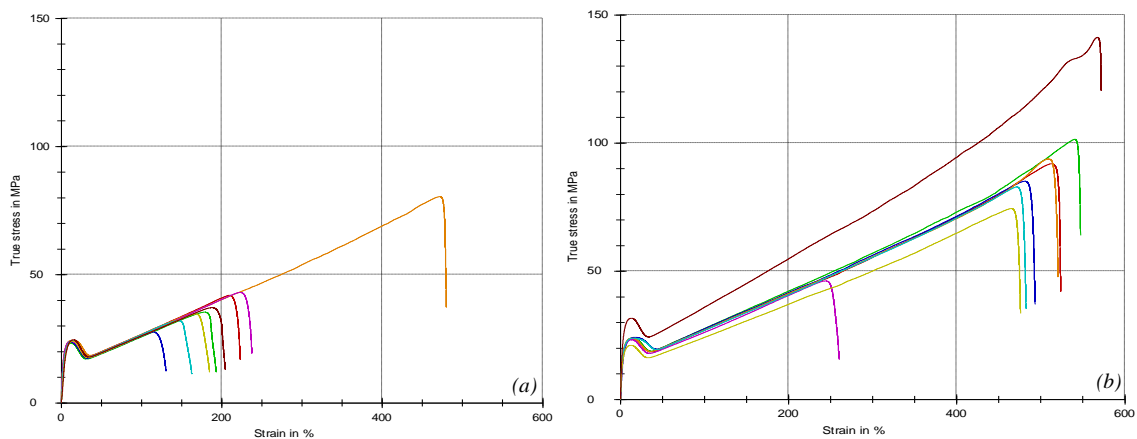


Figure 6: Comportement de la couche externe (CE) ; (a) Direction transversale (DT), (b) Direction longitudinale DL.

Les propriétés mécaniques mesurées sont dans les limites déclarées par les fabricants de tubes HDPE. Pour la couche externe, la différence entre les directions est frappante surtout dans la partie déformation plastique.

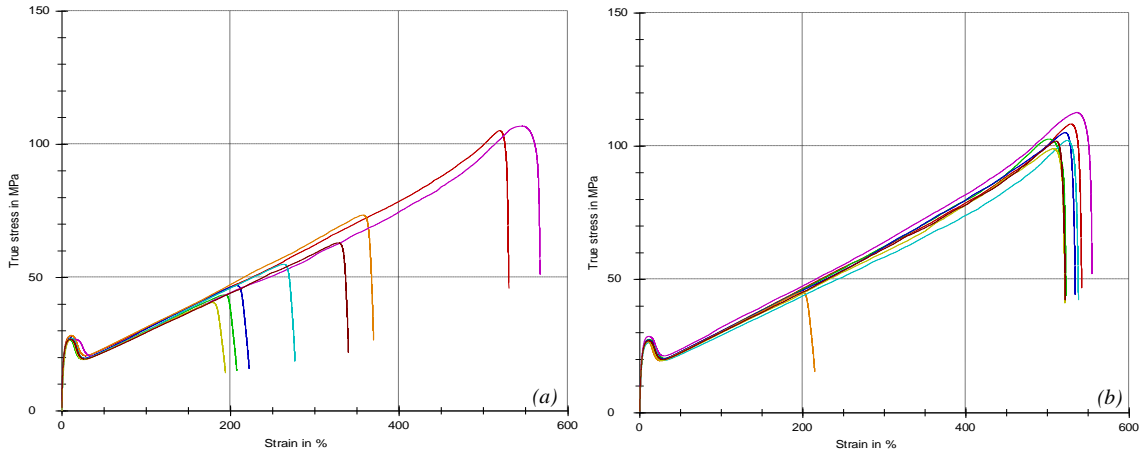


Figure 7 : Comportement de CI, (a) DT, (b) DL.

Pour la même couche de prélèvement, dans les éprouvettes DT, (figs. 6a et 7a), il a été constaté l'absence de durcissement suffisant sachant que le durcissement démarre lorsque la striction se propage tout au long de l'éprouvette (aussi connu par l'étirage plastique à froid). Pour les éprouvettes DL, un durcissement significatif est signalé à l'échelle macroscopique (figs. 6b et 7b). Aussi, dans la zone localisée, une forte réduction d'épaisseur est observée et impliquant pour DL, une contrainte de seuil à l'écoulement moins importante que celle des éprouvettes transversales. Par conséquent, un module d'élasticité plus fort dans le cas DL a été obtenu notamment en utilisant l'analyse statistique comparée des 8 éprouvettes testées, alors que la limite élastique est restée sensiblement la même.

4. DISCUSSION

L'orientation de la chaîne macromoléculaire normalement identifie les propriétés du polymère. En considérant les différences entre les courbes obtenues pour les différents lots d'éprouvettes (figs. 6 et 7), il est observé que près de la couche interne le HDPE est plus résistant avec une contrainte correspondante supérieure de 5 MPa vers 400% de déformation. Les figures 8 a et b montrent un exemple de propriétés mesurées (E et σ_y) obtenues après découpage. Dans tous les cas, les propriétés mécaniques des couches internes sont les meilleures.

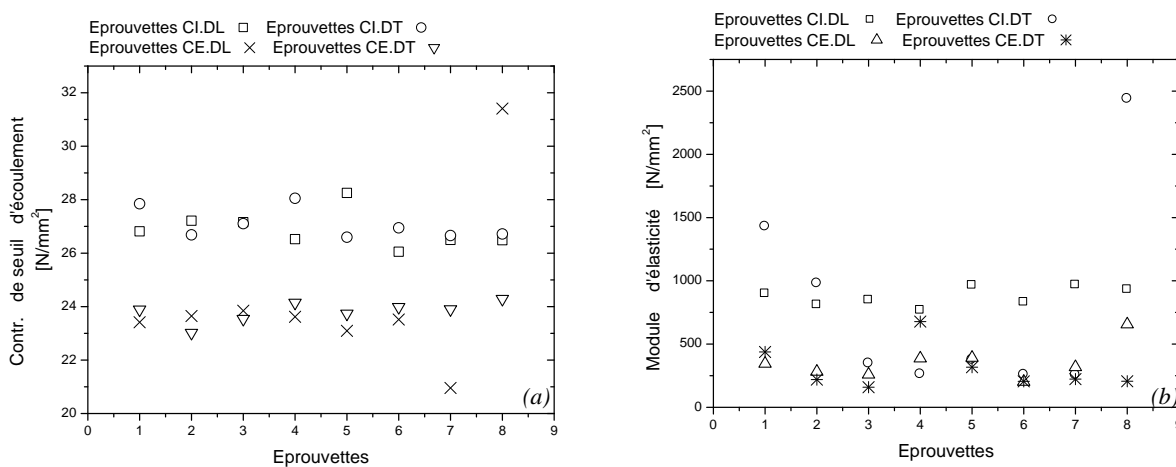


Figure 8: Evolution de σ_y (a) et E (b) dans la couche externe pour DL et DT.

Pour expliquer ces observations, il faut savoir que l'écoulement de matière lors de l'extrusion génère un gradient linéaire de la contrainte de cisaillement dans l'épaisseur du polymère liquide et la valeur de la

contrainte est maximale pour la couche de polymère au contact avec de la filière d'extrusion et nulle pour la couche la plus interne supposée libre de toute contrainte. Au niveau de la structure du HDPE, dans la première couche, les macromolécules désordonnées initialement sous forme d'une pelote statistique sont perturbées par le cisaillement et tendent à s'orienter dans la direction d'application de la pression de formage, c'est-à-dire dans la direction de l'écoulement. Cette orientation préférentielle des chaînes macromoléculaires fait augmenter le potentiel de création de « germes cristallins » dont la densité décroît dans l'épaisseur selon le gradient de la contrainte de cisaillement [12]. On peut conclure que le degré de cristallinité reste un peu ou plus élevé à l'intérieur en raison d'une vitesse de refroidissement plus lente imposée par l'extrusion. Aussi, il est admis que la température de cristallisation a une influence sur la morphologie cristalline produite. Si cette température est basse, la germination est favorisée mais la vitesse de croissance sera faible et on obtient plusieurs zones cristallines de petites tailles, et si elle est suffisamment élevée, peu de germes naissent et l'agitation thermique favorisera alors la croissance. Ceci qui donne lieu à un petit nombre de zones cristallines de grandes tailles donc la morphologie microstructurale du polyéthylène haute densité est influencée par les conditions thermodynamiques lors de la formation du produit [13]. Les couches de polymères n'étant pas soumises à la même vitesse de refroidissement, le degré de cristallinité du HDPE dépend alors de sa mise en œuvre : vitesse de refroidissement, état de solidification, de la nature et la quantité d'adjuvants et enfin, la configuration dominante des chaînes [13-16]. Si le refroidissement est rapide ; comme dans le cas des couches externes, le caractère amorphe sera largement favorisé, donc la cristallisation peut être induite et favorisée mécaniquement, soit à l'état solide soit à partir d'un état fondu, par étirage uniaxial. C'est une orientation préférentielle des chaînes selon l'axe d'étirage qui prend place [16]. En général, le refroidissement rapide et l'absence de phénomène d'orientation sont interprétés par la rupture prématurée des éprouvettes DT, qui auront un degré de cristallinité plus faible. Dans cette étude, le rapport (E/σ_y) de la couche interne est de l'ordre de 30 qui est un indice de performance très intéressant pour effectuer un bon choix de matériau.

5. CONCLUSION

Cette étude permet d'émettre les conclusions suivantes :

- (1) Il est possible de quantifier les contraintes résiduelles par une technique destructive (méthode d'enlèvement de couches), mais il est difficile d'aller à des couches très fines car le HDPE se ramollit rapidement.
- (2) Les valeurs obtenues des contraintes résiduelles sont comparables à celles de la littérature, obtenues par cette technique. Dans ce cas, les contraintes compressives (faibles) sur la couche interne montrent un refroidissement probablement non intentionné.
- (3) Les propriétés mécaniques mesurées dans cette étude sont globalement en concordance avec celles données par les fabricants de tubes HDPE, cependant une distribution est observée.
- (4) A un niveau détaillé, sur la couche externe, la différence entre directions (DL et DT) est claire surtout dans la partie déformation plastique. Il a été constaté l'absence de durcissement suffisant alors qu'un durcissement significatif est signalé à l'échelle macroscopique pour les éprouvettes DL.
- (5) Les différences de propriétés mécaniques sont le résultat de variations au niveau de la structure qu'il faut rendre plus cristalline par des contrôles de production.

Remerciements : Les auteurs remercient Sonelgaz Annaba pour les échantillons et le LMS de l'Université de Guelma pour l'aide matérielle lors de la préparation des éprouvettes.

REFERENCES

- [1] M. Farshad, Two new criteria for the service life prediction of plastic pipes, *Polymer Testing*, 23, 2004, pp. 967-972.
- [2] U. W. Gedde, J. Viebke, H. Leijstrom, M. Ifwarson, Longterm properties of hot water polyolefin pipes- A review, *Polym. Eng. & Sci.*, Vol. 34, N° 24, 1994, pp. 1773-1787.

- [3] A. Ghanbari-Siahkali, P. Kingshott, D. W. Breiby, L. Arleth, C. K. Kjellander, K. Almdal, Investigating the role of anionic surfactant and polymer morphology on the environmental stress cracking of high-density polyethylene, *Polym. Degrad. & Stabil.*, V.89, 2005, pp.442-453.
- [4] B. H. Choi, Z. Zhou, A. Chudnovsky, S. S. Stivala, K. Sehanobish, C. P. Bosnyak, Fracture initiation associated with chemical degradation: observation and modeling, *Int. J. Solid. & Struct.*, 42, 2005, pp. 681-695.
- [5] W. Zhao, R. Nassar, D. Hall, Design and reliability of pipeline rehabilitation liners, *Tunnelling and underground space Technology*, 20, 2005, pp. 203-212.
- [6] S. Rehab-Bekkouche, W. Ghabeche, M. Kaddeche, N. Kiass, K. Chaoui, Mechanical behaviour of machined polyethylene filaments subjected to aggressive chemical environments, *Mechanika*, 77, N° 3, 2009, pp. 40-46.
- [7] J. M Piau., N. El Kissi, F. Toussaint, A. Mezghani, Distortions of polymer melt extrudates and their elimination using slippery surfaces, *Rheol. Acta*, 34, 1995, pp. 40-57.
- [8] Z. W. Guan et J. C. Boot, A method to predict triaxial residual stress in plastic pipes, *Polym. Eng. & Sci.*, Vol. 44, N° 10, 2004, pp. 1828-1838.
- [9] D. M. Hoffman et B. M. McKinley, Crystallinity as a selection criterion for engineering properties of high density polyethylene, *Polym. Eng. & Sci.*, Vol. 25, N° 9, 1985, pp. 562-569.
- [10] H. Fadda, Etude de la rupture des tubes en polyéthylène de haute densité HDPE-100, Mémoire de Magistère, Ecole doctorale Nationale de Mécanique de Construction, Département de Génie Mécanique, UBM Annaba, 2011.
- [11] S. Choi, L. J. Broutman, Residual stress in plastic pipes and fittings, I. Methods for experimental analysis, *Polymer (Korea)*, Vol. 21, N° 1, 1997, pp. 71-82.
- [12] A. Gaucher-Miri, R. Séguéla, Tensile yield of PE and related copolymers: Mechanical and structural evidences of two thermally activated processes, *Macromolecules*, 1997, 30, p. 1158-1167.
- [13] D. S. Li, H. Garmestani, R. G. Alamo, S. R. Kalidindi, The role of crystallinity in the crystallographic texture evolution of polyethylenes during tensile deformation, *Polymer*, 44, 2003, pp. 5355-5367.
- [14] L. Hubert, L. David, R. Séguéla, G. Vigier, C. Corfias-Zuccalli, Y. Germain, Physical and mechanical properties of polyethylene for pipes in relation to molecular architecture. II. Short term creep of isotropic and drawn materials, *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 84, 2002, pp. 2308-2317.
- [15] C. Fond, C. G'Sell, Localisation des déformations et mécanismes d'endommagements dans les polymères multi phases, *Mécanique & industries*, Vol. 3, N°5, 2002, pp. 431-438.
- [16] L. Mandelkern, *Crystallization of Polymers: Kinetics and Mechanisms*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.