

# STUDY OF IMPACT FRACTURE TOUGHNESS VARIATIONS THROUGH POLYETHYLENE PIPE WALL

Mounia Kaddeche <sup>1</sup>, Kamel Chaoui <sup>2</sup>, Salim Belhadi <sup>3</sup>, Mohamed-Athmane Yaltese <sup>3</sup>

<sup>1</sup> LR3MI, Mechanical Eng. Dept., 8 Mai 1945 University, P.O. Box 401, Guelma 24000, Algeria

<sup>2</sup> LR3MI, Mechanical Eng. Dept., Badji Mokhtar University of Annaba, P.O. Box 12, Annaba 23052, Algeria

<sup>3</sup> LMS, Mechanical Eng. Dept., 8 Mai 1945 University, P.O. Box 401, Guelma 24000, Algeria

\*E-mail address: [chaoui.kam23@gmail.com](mailto:chaoui.kam23@gmail.com)

## ABSTRACT

The increasing use of polymers in engineering applications requires investigation new and efficient methodologies to assess the ability of materials to withstand long-term service loads. Impact tests are widely used to characterize breaking strength because they simulate the most severe loading form to which a material can be subjected. Although impact is not the most probable of operational risks, it is considered as the most critical loading conditions in service life given the fact that failure usually occurs at high deformation rates and in the presence of notches or stress concentrators. The impact strength analysis of extruded polyethylene tubes presents an additional difficulty, due to the interaction between orientation and crystallization of the structure, leading to a complex anisotropic morphology. This study is based on the extension of the methodology for the determination of the radial resilience of polyethylene pipe using arc-shaped samples as numerically formulated by Niglia et al. [1] and in accordance with ISO/DIS-17281. The study investigates the evolution of the fracture energy ( $G_{IC}$ ) through the pipe wall using a specific numerical function ( $Y$ ) relating crack length to specimen width ( $a/w$ ). The samples are cut and machined under appropriate conditions from a HDPE-100 tube with a 200 mm nominal diameter and a specific dimension ratio (SDR) of 16. The first batch of impact specimens is prepared to establish impact fracture energy ( $U$ ; kJ/m<sup>2</sup>) measurements at 6 different positions (rings) along the pipe ( $z$ -direction) and each position (or ring) is represented by 5 machined C-specimen specimens covering the entire pipe circumference ( $\theta$ -direction). The second lot of specimens is also C-shaped with an inner central increasing notch used to measure the impact fracture energy when changing positions from the outer layer to the inner layer of the pipe ( $r$ -direction). It is found that average experimental  $G_{IC}$  values vary between 7.86 and 8.18 kJ/m<sup>2</sup> for the  $z$ -direction and between 7.49 and 8.24 kJ/m<sup>2</sup> for the  $\theta$ -direction. The low standard deviations indicate that  $G_{IC}$  can be considered as a rather constant property for a given pipe wall depth and at any position along  $z$ -direction. This is a verification that the manufacturing process is delivering similar products with homogeneous properties following melt extrusion and associated water cooling. However, in the radial direction (i.e. for different depths), average  $G_{IC}$  values grew about 5 times; explicitly from 5.28 kJ/m<sup>2</sup> up to 25.90 kJ/m<sup>2</sup> when going from the outer side to the inner side of the pipe. Consequently, as the position varied across the pipe wall; it was possible to establish a trend for  $G_{IC}$  values. The impact toughness is found to be lower at the outer pipe layers compared to the inner ones. Such conclusion is in accordance with morphological and structural data of literature.

## 1. Introduction:

L'utilisation ascendante des matériaux polymères dans les applications d'ingénierie exige de nouvelles méthodologies afin d'évaluer la capacité des matériaux à résister à des charges de services. Les essais d'impact sont largement utilisés pour caractériser la résistance à la rupture des matériaux car ils tentent de simuler les conditions de charge les plus sévères auxquelles un matériau peut être soumis.

## 2. Bases théoriques:

Selon le concept de la mécanique linéaire élastique de rupture (LEFM) la résistance à la rupture au choc (ou le taux de restitution de l'énergie critique)  $G_C$  est donné par:

$$G_C = \frac{U}{BW\Phi(a/W)} \quad (1)$$

Où:  $U$  est l'énergie restituée à l'initiation de la fissure,

$B$  épaisseur de l'échantillon (considérée uniforme),

$W$  est la largeur de l'échantillon dans la direction de la propagation de la fissure,

$\Phi$  est un facteur de correction géométrique relié à la fonction de complaisance par la relation (2):

$$\Phi = \frac{c}{dc/d(\frac{a}{W})} \quad (2)$$

Il est donc clair que la valeur de  $G_C$  dépend de l'exactitude de la fonction  $\Phi(a/W)$ . Pour des spécimens SEN(B), les valeurs de  $\Phi(a/W)$  ont été évaluées pour différentes géométries dans la norme ISO 17281 [2]. Les procédés de fabrication des tubes sont susceptibles de changer les propriétés de ces derniers et leurs propriétés sont différentes de celles obtenues par des spécimens parallélépipédiques découpés à partir des plaques obtenues par compression [21,22]. Il est donc nécessaire d'utiliser des spécimens découpés directement à partir du tube sous forme d'arc.

Dans l'étude [1] Niglia a établi une expression pour le facteur de correction géométrique  $\Phi$  en combinant la fonction de calibration obtenue de la norme ASTM 399-90 avec les résultats de la complaisance obtenus par la méthode des éléments finis (FE). La

même procédure est faite par Nezbedova [23,24] pour étudier des tubes multicouches. Ozbek [2] a établi une étude sur une large gamme des tubes en polymères. Selon le concept de la mécanique linéaire élastique de rupture (LEFM) la géométrie des échantillons est très déterminante sur les résultats obtenus. Le facteur d'intensité de contraintes de Irwin pour une longueur de fissure  $a$ , dépend de la charge appliquée, du paramètre dimensionnel  $Y$  et de la géométrie de l'échantillon.

$$K = Y \sigma \sqrt{a} \quad (3)$$

Pour une géométrie 2D (Deux dimensions) de l'échantillon et pour une épaisseur constante  $B$ , la contrainte appliquée est donnée par :

$$\sigma = P/BX \quad (4)$$

Où:  $X$ : les dimensions planes suitées. Le taux de restitution de l'énergie est donné par la relation de Irwin-Kies:

$$G = \frac{1}{2} P^2 \frac{dC}{dA} \quad (5)$$

La géométrie de l'échantillon détermine la fonction de complaisance  $C(a)$ .  $K$  et  $G$  sont liés par la relation:

$$K^2 = E' G \quad (6)$$

Où:  $E'=E$  sous contraintes planes et  $E'=E/(1-\nu^2)$  sous déformations planes et  $\nu$  est le coefficient de Poisson.

A partir des relations (3) et (6), on peut écrire:

$$E \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} = Y^2 \sigma^2 a \quad (7)$$

Pour un échantillon en forme d'arc (arc-shaped) SEN (Single Edge Notched spécimen) sollicité en flexion à 3 points, la norme ASTM E 39 9-90 décrit le facteur d'intensité de contraintes  $K$  en terme de deux fonctions géométriques,  $h(a/W)$  et  $f(a/W)$ .

On peut donc écrire la relation:

$$K = \frac{PS}{BW^{3/2}} \left[ 1 + (1 - r)h\left(\frac{a}{W}\right) \right] f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (8)$$

Où:  $r$  est le rapport entre le diamètre interne et le diamètre externe du tube. Des équations (6) et (8):

$$Y = \frac{2}{3} \left(\frac{a}{W}\right)^{-1/2} \left[1 + (1 - r)h\left(\frac{a}{W}\right)\right] f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (9)$$

Cette relation est utilisée pour calculer la complaisance (équation 10) et la fonction  $\phi$  à partir de l'équation (2):

$$C = \frac{2}{BE'} \left(\frac{a}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + (1 - r)h\left(\frac{a}{W}\right)\right] f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (10)$$

### 3. Procédure expérimentale:

#### 3.1 Matériau:

Les échantillons de cette étude sont découpés à partir d'un tube en HDPE de grade 100, de diamètre extérieur 200mm et ayant un SDR 16, destiné au transport d'eau potable.

#### 3.2 Echantillons:

Deux lots de spécimens ont été préparés. Le premier lot contient des éprouvettes appartenant à la couche médiane du tube (obtenue par alésage et chariotage) et ayant les mêmes dimensions. Ces spécimens sont uniformément répartis dans la longueur du tube et dans le sens radial (figure 1). Les spécimens sont découpés selon les formes et dimensions prescrites par la norme ASTM E 399-90 [3,25].

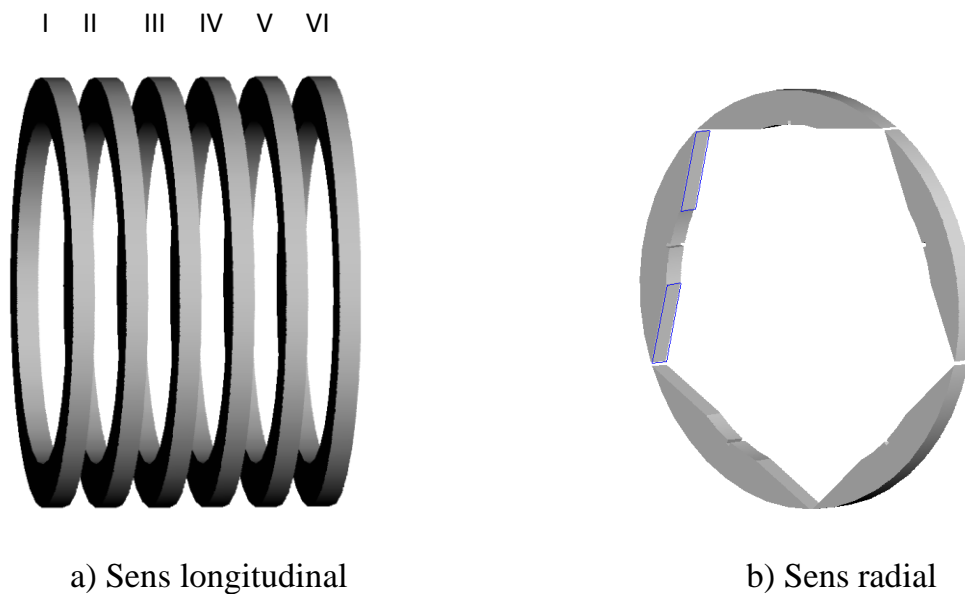
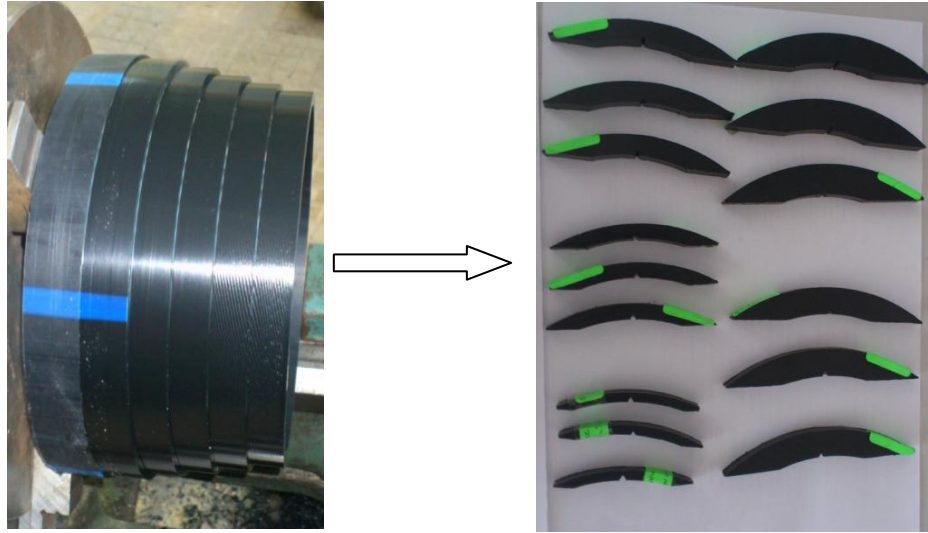


Figure 1: Disposition des arcs dans le tube

Un deuxième lot de spécimen est également découpé sur le même tube en variant cette fois les épaisseurs des spécimens pour mesurer la résilience du matériau à chaque couche du tube (figure 2).



**Figure 2:** Spécimens du lot 2

#### 4. Résultats et discussions:

##### 4.1 Evolution de la résilience à travers un tube en HDPE-100:

Pour des spécimens en forme d'arc extraits à partir d'un tube (notre cas d'étude) Niglia [1] à présenté les relations permettant de calculer les fonctions  $f(a/W)$  et  $h(a/W)$ :

$$f_1\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{0.677 + 1.087\left(\frac{a}{W}\right) - 1.43\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.669\left(\frac{a}{W}\right)^3}{(1-a/W)^{3/2}} \quad (11)$$

$$h_1(a/W) = 0.29 - 0.66(a/W)(a/W) + 0.37(a/W)^2 \quad (12)$$

Ces relations sont valides pour un pourcentage d'erreur  $\pm 1\%$  pour  $0.2 < a/W < 1$ . La constante géométrique  $\alpha$  est prise comme pour le cas des éprouvettes SE(B) [20]:  $\alpha=3S/2W$ .

On peut donc obtenir l'expression de la complaisance comme suit:

$$C' = (-52.488 + 10.08r + 1.031r^2)x + (2.822 - 10.656r)x^2 + 6.008rx^3 + (-14.832 + 11.88r)x^4 + (-64.224 + 26.064r - 0.202r^2) \ln(1-x) - \frac{(19.44-5.059r)}{(1-x)} + \frac{15.84}{(1-x)^2} \quad (13)$$

Où:  $x=a/W$  et  $r=r1/r2$ . La relation (13) est valide à 99% [1].

Les valeurs de  $B/W$  et  $S/W$  sont constantes (figure 26 chapitre 2) et  $C_0$  est fonction de  $r1/r2$ . Pour  $0.6 < r1/r2 < 1$  et  $a/W=0.20$  et  $v=0.3$ ,  $C_0$  est donné par la relation (14) avec 1% d'erreur et la fonction  $\phi$  est donnée par la relation (15) similaire à celle de l'étude [15]:

$$C_0(r) = 10.879 + 3.136e^{(2.655-4.425r)} - 2.165r - 2.51r^2 \quad (14)$$

$$\phi = \frac{c'+C_0}{dc'/dx} \quad (15)$$

où:

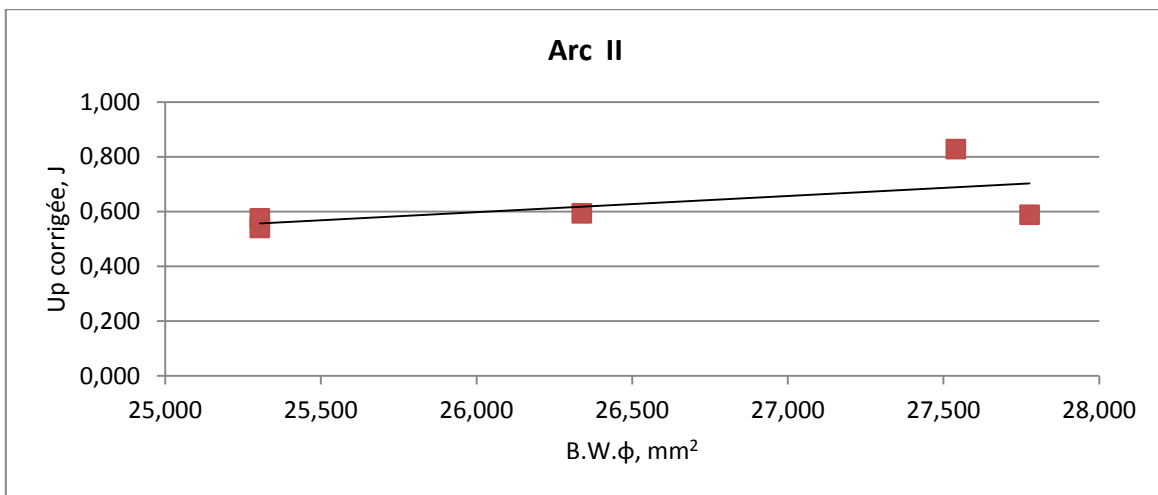
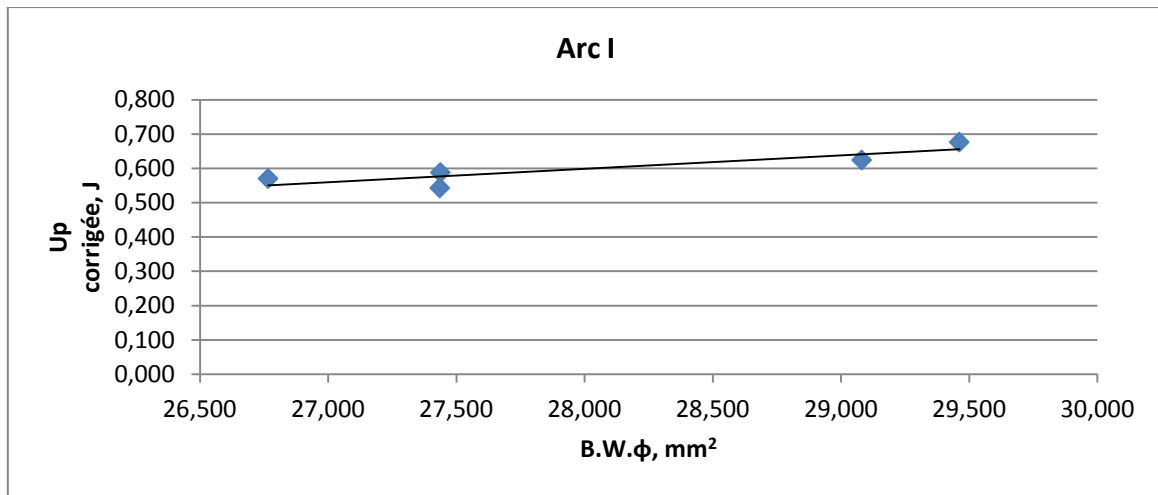
$$\begin{aligned} \frac{dc'}{dx} = & -52.488 + 10.080r + 1.031r^2 + (5.645 - 21.312r)x + 18.023rx^2 + \\ & (59.328 - 47.52r)x^3 + \frac{(64.224-26.064r+0.202r^2)}{(1-x)} - \frac{(19.44-5.059r)}{(1-x)^2} + \frac{31.68}{(1-x)^3} \end{aligned} \quad (16)$$

Pour ce lot d'éprouvettes *les valeurs de  $x=a/W$  et  $r=r1/r2$*  sont représentées dans le tableau 13 du chapitre 2. En les remplaçant dans les relations (13) à (16) on obtient les facteurs de correction pour chaque éprouvette. Le tableau 1 regroupe les valeurs des facteurs de correction de l'énergie des 30 échantillons testés appartenant au lot 1.

**Tableau 1:** Facteurs de correction d'énergie des échantillons

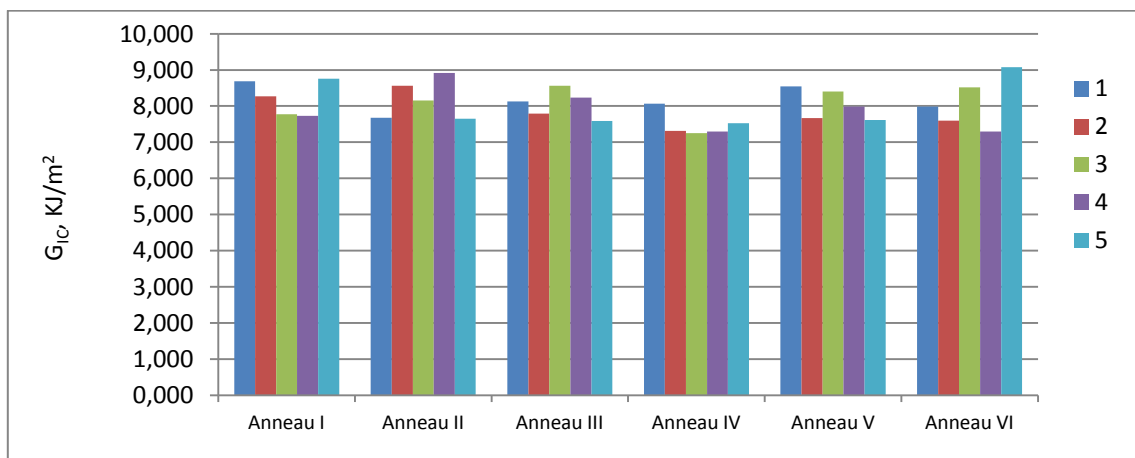
Anneaux	Arc	E(mm)	W(mm)	a(mm)	B(mm)	r1/r2	$C'$	$C_0(r)$	$dC'/dx$	$\phi$
I	1	11.2	10.3	2	8.2	0.77	5.92	9.20	46.03	0.33
	2	11.2	10.3	2	8.23	0.77	5.92	9.20	46.03	0.33
	3	11.2	10.6	2	8.25	0.77	5.67	9.20	44.78	0.33
	4	11.2	10.1	2	8.39	0.77	6.10	9.20	46.93	0.33
	5	11.2	10.7	2	8.24	0.77	5.59	9.20	44.38	0.33
II	1	11.2	10.3	2	8.11	0.77	5.92	9.20	46.03	0.33
	2	11.2	10.6	2	8.26	0.77	5.67	9.20	44.78	0.33
	3	11.2	10.1	2	8.13	0.77	6.10	9.20	46.93	0.33
	4	11.2	10.7	2	8.26	0.77	5.59	9.20	44.38	0.33
	5	11.2	10.2	2	8.22	0.77	6.01	9.20	46.47	0.33
III	1	11.2	10.3	2	8.14	0.77	5.92	9.20	46.03	0.33
	2	11.2	9.6	2	8.25	0.77	6.59	9.20	49.42	0.32
	3	11.2	10.1	2	8.00	0.77	6.10	9.20	46.93	0.33
	4	11.2	10.3	2	8.21	0.77	5.92	9.20	46.03	0.33
	5	11.2	9.6	2	8.25	0.77	6.59	9.20	49.42	0.32
IV	1	11.2	10.1	2	8.32	0.77	6.10	9.20	46.93	0.33
	2	11.2	10.7	2	8.89	0.77	5.59	9.20	44.38	0.33
	3	11.2	10.1	2	8.25	0.77	6.10	9.20	46.93	0.33
	4	11.2	10.7	2	8.20	0.77	5.59	9.20	44.38	0.33
	5	11.2	10.5	2	8.22	0.77	5.75	9.20	45.18	0.33
V	1	11.2	10.4	2	8.23	0.77	5.83	9.20	45.60	0.33
	2	11.2	10.3	2	8.25	0.77	5.92	9.20	46.03	0.33
	3	11.2	9.6	2	8.2	0.77	6.59	9.20	49.42	0.32
	4	11.2	10.1	2	8.33	0.77	6.10	9.20	46.93	0.33
	5	11.2	10.7	2	8.24	0.77	5.59	9.20	44.38	0.33
VI	1	11.2	10.4	2	7.75	0.77	5.83	9.20	45.60	0.33
	2	11.2	10.7	2	8.02	0.77	5.59	9.20	44.38	0.33
	3	11.2	10.1	2	8.12	0.77	6.10	9.20	46.93	0.33
	4	11.2	8.2	2	8.13	0.77	8.49	9.20	59.07	0.30
	5	11.2	10.1	2	7.86	0.77	6.10	9.20	46.93	0.33

Les courbes de la figure 3 représentent les valeurs corrigées des énergies de choc en fonction de la fonction de complaisance pour des échantillons appartenant à trois différents arcs du tube.



**Figure 3:** Valeurs corrigées des énergies de chocs en fonction de la complaisance

Pour étudier la variation de la résilience (résistance au choc) dans le sens radial et le sens longitudinal du tube les valeurs de ces énergies sont regroupées dans la figure 4.



**Figure 4:** Evolution de la résilience d'un tube en HDPE (sens radial et longitudinal)



A partir des histogrammes de la figure 4 on peut voir beaucoup de dispersions dans les valeurs de  $G_{IC}$ , pour cela nous allons faire une étude statistique pour mieux quantifier ces variations et leur évolution dans les deux sens longitudinal et radial.

**Tableau 2:** Variation de  $G_{IC}$  dans le sens longitudinal et le sens radial dans la paroi du tube.

	Anneau I	Anneau II	Anneau III	Anneau IV	Anneau V	Anneau VI	Moyenne	Ecart-type
1	8.690	7.680	8.126	8.066	8.547	7.986	8.182	0.374
2	8.266	8.561	7.791	7.313	7.670	7.594	7.866	0.462
3	7.776	8.159	8.563	7.250	8.403	8.517	8.111	0.512
4	7.730	8.914	8.232	7.299	7.984	7.299	7.910	0.616
5	8.754	7.648	7.585	7.525	7.618	9.072	8.034	0.690
Moyenne	8.243	8.193	8.059	7.490	8.044	8.094		
Ecart-type	0.485	0.552	0.382	0.338	0.420	0.712		

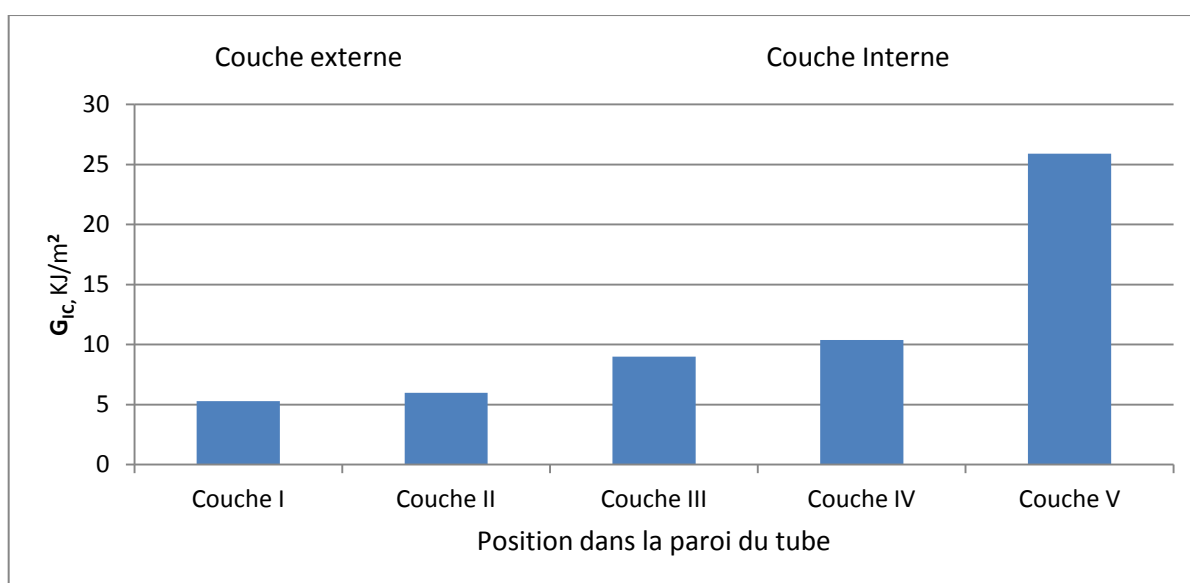
Les résultats présentés dans le tableau 2 montrent que la variation de  $G_{IC}$  dans le sens longitudinal et radial n'est pas très importante.

#### **4.2 Evolution de la résilience à travers la paroi d'un tube en HDPE-100:**

Pour cette étude nous allons nous intéresser à l'évolution de la résilience dans l'épaisseur du tube en HDPE-100. Pour cela nous avons usiné les échantillons dans 5 couches du tube. Les dimensions des échantillons sont regroupées dans le tableau 12 du chapitre 2. Pour calculer les facteurs de correction de l'énergie de rupture nous avons utilisé les équations (11) à (16). Les résultats sont résumés dans le tableau 3 pour les 15 échantillons utilisés. La figure 5 représente les valeurs de la résistance à la rupture au choc de chaque couche du tube en HDPE.

**Tableau 3:** Facteurs de correction des énergies de rupture au choc

	Spécimen	$x= a/W$	$r=r1/r2$	$C'$	$C_0(r)$	$\frac{dC'}{dx}$	$\phi$
Couche I (externe)	A	0.098	0.83	2.65	8.51	27.34	0.41
	B	0.097	0.83	2.64	8.51	27.27	0.41
	C	0.098	0.83	2.67	8.51	27.41	0.41
Couche II (Intermédiaire)	A	0.109	0.85	3.08	8.22	28.76	0.39
	B	0.111	0.85	3.14	8.22	29.04	0.39
	C	0.108	0.85	3.05	8.22	28.58	0.39
Couche III (Médiane)	A	0.123	0.88	3.61	7.92	30.63	0.38
	B	0.124	0.88	3.63	7.92	30.75	0.38
	C	0.121	0.88	3.54	7.92	30.27	0.38
Couche IV (Intermédiaire)	A	0.154	0.91	4.71	7.61	35.49	0.35
	B	0.154	0.91	4.71	7.61	35.49	0.35
	C	0.152	0.91	4.63	7.61	35.06	0.35
Couche V (Interne)	A	0.215	0.94	7.33	7.30	48.20	0.30
	B	0.215	0.94	7.33	7.30	48.20	0.30
	C	0.217	0.94	7.44	7.30	48.78	0.30



**Figure 5:** Evolution de la résilience à travers la paroi du tube en HDPE-100

A partir de ces résultats on peut constater que la couche interne du tube est nettement plus résistante au choc par rapport aux autres couches du tube. Ceci est expliqué par le mode de fabrication de ces tubes. En effet à la sortie du tube de l'extrudeuse il est refroidit brusquement par un jet d'eau ce qui fragilise la couche externe.

Pour une meilleure lecture de la variation de la résilience entre les différentes couches du tube en HDPE-100, une étude statistique à été menée. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

**Tableau 4:** Variation de  $G_{IC}$  à travers la paroi d'un tube en HDPE100

	Couche I	Couche II	Couche III	Couche IV	Couche V	Moyenne	Ecartype
Arc 1	5.58	5.94	11.25	11.95	29.57	12.86	9.79
Arc 2	5.39	6.26	7.51	10.22	22.86	10.45	7.17
Arc 3	4.88	5.78	8.24	9.00	25.27	10.63	8.36
Moyenne	5.28	5.99	9.00	10.39	25.90	11.31	8.44
Ecartype	0.36	0.24	1.98	1.48	3.40		

Les résultats du tableau 4 confirment le fait que la variation dans le sens de l'épaisseur du tube est très significative.

### **Conclusions :**

Nous avons déterminé la résistance radiale à la rupture au choc du polyéthylène de haute densité tubulaire de grade 100. Pour cela nous avons utilisé des éprouvettes en forme d'arc pour préserver l'historique du matériau. Une fonction de correction a été utilisée.

Les résultats montrent que la résilience du tube en HDPE-100 est quasi constante le long du tube et dans la direction radiale, Cependant une grande différence est remarquée entre les différentes couches du tube. La couche interne est la plus tenace ceci est dû au mode de fabrication de ces tubes.

### **5. Références:**

1. J. Niglia, A. Cisilino, R. Seltzer, P. Frontini, Determination of impact fracture toughness of polyethylene using arc-shaped specimens, *Engineering Fracture Mechanics* 69 (2002) 1391–1399.

2. Pemra Özbek, Christos Argyrakis and Patrick Leever Fracture mechanics analysis of arc shaped specimens for pipe grade polymers, Elsevier 2009.
3. Dormier EJ, Yamoska BS, Dan E. Evaluation of linear polyethylene by instrumented impact analysis. Proceedings of ANTEC'84, 1984. p. 294–296.
4. Lu X, Zhou Z, Brown N. The anisotropy of slow crack growth in polyethylene pipes. *Polym Eng Sci* 1994;34: 109–15.
5. Mouzakis DE, Karger-Kocsis J. Effects of gasoline absorption on the tensile impact response of HDPE/Selare laminar microlayer composites. *J Appl Polym Sci* 1998;68:561–9.
6. Dale BA, Moyer MC, Sampson TW. A test program for the evaluation of oil filled thread protectors. *J Pet Technol* 1985:306–14.
7. Wheel MA, Leever PS. High speed double torsion tests on tough polymers. II: nonlinear elastic dynamic analysis. *Int J Fract* 1993;61:349–59.
8. Greig JM, Leever PS, Yayla P. Rapid crack propagation in pressurized plastic pipe. I: full scale and small scale RCP testing. *Eng Fract Mech* 1992;42:663–73.
9. Yayla P, Leever PS. Rapid crack propagation in pressurized plastic pipe. II: critical pressures for polyethylene pipes. *Eng Fract Mech* 1992;42:675–82.
10. Han L-H, Deng Y-C, Liu C-D. The determination of JIC for polyethylene pipe using non-standard arc-shaped specimen. *Int J Pressure Vessels Piping* 1999;76:647–51.
11. Leever P. Impact and dynamic fracture of tough polymers by thermal decohesion in a Dugdale zone. *Int J Fract* 1995;73:109–27.
12. Garc\_ia Brosa V, Bernal C, Frontini P. Calibration of fracture mechanics parameters and J–R curve determination in polyethylene side-grooved arc-shaped specimens. *Eng Fract Mech* 1999;62:231–48.
13. Frassine R, Rink M, Pavan A. Discontinuous creep crack growth in polyethylene. *Plastics, Rubber Compos, Process Appl* 1996;25:1–5.
14. Kenner VH, Popelar CH, Popelar SF. Proceedings of ICF7, Houston, USA, 1989. p. 2853/2859 (Part I) and p. 2861/2869 (Part II).
15. ISO/DIS 17281 Standard. Ausgabe: 2001-2003, Plastics—determination of fracture toughness (GIC and KIC) standard for determining for plastics at moderately high loading rates (1 m/s).

16. Kanninen M, Propelar C. Advanced fracture mechanics. 1985. p. 555 [chapter 4].
17. Leever PS, Morgan RE. Impact fracture of polyethylene: a non-linear-elastic thermal decohesion model. *Eng Fract Mech* 1995;52(6):999–1014.
18. Pavan A, Williams JG. Development of a standard for determining KIC and GIC for plastics at high loading rates: the ISO/DIS 17281 standard for 1 m/s testing, limitations of test methods for plastics, ASTM STP 1369, 1999.
19. Williams JG, Adams GC. The analysis of instrumented impact tests using a mass-spring model. *Int J Fract* 1987;33: 209–22.
20. Plati E, Williams JG. The determination of the fracture parameters for polymers in impact. *Polym Eng Sci* 1975;15:470–7.
21. P. Davis. *Process/property interactions in the new polyethylenes*. PhD thesis, University of London, 1999.
22. R. K. Krishnaswamy, P. S. Leever, M. J. Lamborn, A. M. Sukhadia, D. F. Register, and P. L. Maeger. Rapid crack propagation (RCP) failures in HDPE pipes: structure-property investigations. *Polymer Engineering and Science*, 46:1358–1362, 2006.
23. E. Nezbedová, Z. Knesl, and B. Vlach. Determination of impact fracture toughness of polyethylene using arc-shaped specimens. *Plastics, Rubber and Composites*, 36(5):207–212, 2007.
24. J. Niglia, A. Cisilino, R. Seltzer, and P. Frontini. Determination of impact fracture toughness of polyethylene using arc-shaped specimens. *Strength of Materials*, 40(1):134–137, 2008.
25. Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. ASTM E399-90-A9.