

# Caractérisation et modélisation des déformations résiduelles dans les tubes en polyéthylène haute densité de transport de gaz

S. REHAB BEKKOUCHE <sup>a</sup>, K. CHAOUI <sup>b</sup>.

*a* Département de Génie civil, Faculté de technologie, Université du 20 Aout 1955 Skikda 21000, Algérie, [solrehab@yahoo.fr](mailto:solrehab@yahoo.fr)

*b* Laboratoire de Recherche en 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, [chaoui@univ-annaba.org](mailto:chaoui@univ-annaba.org)

## Résumé :

Dans cette communication, nous présentons une approche expérimentale portant sur l'étude de l'évolution des déformations résiduelles à travers la paroi des tubes en polyéthylène HDPE-80 sur le comportement mécanique d'une part et d'autre part, sur l'effet des agents chimiques se trouvant dans le sol et qui peuvent entrer en interaction avec les tubes enfouis. Les résultats indiquent que le polyéthylène est très influencé par la présence d'acides et de solvants qui le dégradent. La modélisation des contraintes et des déformations résiduelles obéit à des équations très différentes de celles qui régissent la mise en forme du fondu.

## Abstract :

In this paper, we present an experimental study on the evolution of residual strain through the wall polyethylene pipes HDPE-80 on the mechanical behavior on the one hand and on the other hand, the effect chemical agents present in the soil and which can enter into interaction with the tubes buried. The results indicate that the polyethylene is strongly influenced by the presence of acids and solvents that degrade it. The modeling of residual stresses and deformations of equations obeys very different from those that govern the formatting of melted.

**Mots clefs** : Mécanique/ déformations/ résiduelles/ environnement/ HDPE.

## 1 Introduction

Le développement des polymères est lié à leurs propriétés mécaniques, qui dépendent elles-mêmes de la microstructure. C'est ainsi que les polymères semi-cristallins ont pour la plupart une ténacité élevée qui répond aux exigences de produits devant résister à des conditions d'utilisation sévères (impact, fluage, fatigue). Parmi ces matériaux, le polyéthylène à haute densité reçoit une double attention depuis de nombreuses années [1].

A travers le monde et en Algérie, les résines de polyéthylène de haute densité (HDPE) sont transformées en grandes échelles en tubes et assemblages pour construire des réseaux de transport et de distribution de gaz naturel dans les villes.

Les systèmes en PE supportent les effets des mouvements du sol dus aux instabilités et aux grandes variations de température. Du fait de leur bonne résistance à la fissuration, les canalisations en PE présentent un degré de fiabilité élevé dans des conditions d'utilisations normales. Dans ces conditions leur durée de vie est estimée à plus de 50 ans sur la base de courbes de régression construites à partir d'essais accélérés en pression hydraulique [2].

Les propriétés mécaniques dépendent dans une très large mesure de constitution du matériau, c'est-à-dire non seulement de sa composition chimique, mais aussi de l'organisation des diverses phases présentes (leur taille, leur forme, leur distribution), donc de sa microstructure [3].

La description des caractéristiques mécaniques des PE a été largement traitée dans la littérature. Par exemple de nombreuses études se sont consacrées à la caractérisation complète de la courbe de traction uniaxiale et à l'explication détaillée de ses différentes caractéristiques, certaines propriétés telles que le taux de déformation naturel restant encore à bien explorer [4].

Ces propriétés peuvent être influencées par l'action des agents chimiques, les solvants agissent comme des plastifiants, et parce qu'ils augmentent la distance entre ces chaînes, la valeur du module d'élasticité du matériau diminue [3].

Grâce à la nature paraffinique de sa molécule, le polyéthylène est extrêmement résistant à l'eau, l'absorption d'eau à la température ambiante étant négligeable.

Le polyéthylène est susceptible de s'oxyder, en particulier en présence des rayons ultra-violet. Une exposition prolongée à la chaleur accélère encore l'oxydation, avec détérioration considérable des propriétés électriques et mécaniques et de l'aspect [5]. Le comportement des matériaux polymères à la déformation diffère de celui des métaux de construction en ce qu'il n'est pas seulement fonction de l'ordre de grandeur de la contrainte, mais également de la durée d'application. Le fluage des polymères et des plastiques peut être important, même à la température ambiante, alors que pour les métaux, il ne l'est jamais au-dessous de 500°C. De plus, la température et le mode d'application de la contrainte affectent beaucoup plus les propriétés mécaniques des polymères et des plastiques que celles des métaux. Ces propriétés peuvent aussi être influencées par le procédé de fabrication, un traitement ultérieur et l'âge du produit fini.

Dans des applications techniques, la déformation est un facteur bien plus important pour les plastiques que pour les autres matériaux. Le projeteur doit donc bien connaître le comportement mécanique des matériaux polymères pour ne pas dépasser les contraintes maximales permises afin d'éviter des ruptures. Comme pour la plupart des matériaux, une simple courbe traction- allongement constituera un bon élément de base pour connaître le comportement mécanique de tel plastique ou de tel polymère.

Au cours du temps et selon les modes d'utilisation des matières plastiques, on observe souvent une altération de leurs propriétés, altération qui peut entraîner la mise hors service des produits. Le vieillissement des matières plastiques se manifeste par une dégradation, souvent lente mais toujours irréversible, de leurs propriétés. Des effets de cette dégradation découlent de la notion de "durée de vie" du matériau, c'est-à-dire le temps nécessaire pour qu'une propriété (physique, chimique ou électrique) atteigne un seuil au-dessous duquel le matériau devient inutilisable [3].

Le but de ce travail est d'étudier l'interaction de quelques milieux chimiques avec les tubes en polyéthylène haute densité destinés à la distribution et au transport d'eau, en s'appuyant sur les résultats d'essais de traction uni axial.

## 2 Etude expérimentale

### 2.1 Matériau et préparation des éprouvettes

Le matériau considéré est utilisé pour la production de tubes destinés à la distribution de gaz, ils sont de fabrication algérienne (Sonelgaz). Ces tubes ont un diamètre extérieur 125mm et intérieur 101mm et un SDR de 11. Ils possèdent les propriétés suivantes:

**Tableau I**, Propriétés mécaniques et thermiques du polyéthylène utilisé dans les tests [6]

| Propriété  | Valeur  |
|--|---------|
| Densité (g/cm <sup>3</sup> )   | 0,95    |
| Absorption d'eau (sur 24h basis)                                     | < 0,01% |
| Coefficient d'expansion thermique (10 <sup>6</sup> K <sup>-1</sup> ) | 100-200 |
| Coefficient de Poisson   | 0,46    |
| Coefficient de frottement  | 0,29    |
| Dureté Rockwell (shore)  | D 60-73 |
| Module de tension (GPa)  | 0,5-1,2 |
| Résistance aux chocs, IZOD (J/m)                                     | 20-210  |
| Résistance à la traction (MPa)                                       | 15-40   |

La technique de préparation des éprouvettes consiste à tronçonner le tube par un tour universel en variant l'avancement dans le sens longitudinal. Pour maintenir le tube pendant l'usinage, un mandrin en bois est

préparé pour être emboîté par le tube (Kiass et Chaoui, 2004). L'outil à tronçonner utilisé est en acier et de 1,8 mm d'épaisseur. Pour minimiser l'effet de la chaleur résultante au tronçonnage, la vitesse choisie a été 45 rpm. Les éprouvettes choisies ont la forme de couronnes (anneau) d'une même largeur.

## 2.2 Procédure Expérimentale

Les essais présentés dans cette section ont été réalisés au LR3MI université d'Annaba. Les éprouvettes préparées à partir du tube de gaz, ont été découpées suivant une génératrice, et imprégnées dans les environnements chimiques présentés dans le tableau 2, afin de déterminer l'effet de ces derniers sur les propriétés mécaniques du matériau et les déformations résiduelles en fonction du temps.

**Tableau II**, Différents environnements chimiques

| Environnement chimique | Nombre d'éprouvettes |
|------------------------|----------------------|
| 1% Hcl                 | 2                    |
| 10% Hcl                | 2                    |
| 20% Hcl                | 2                    |
| 1% H2SO4               | 2                    |
| 10% H2SO4              | 2                    |
| 20% H2SO4              | 2                    |
| Pétrole brut           | 2                    |
| Toluène méthanol       | 2                    |
| Eau distillée          | 2                    |
| Air libre              | 1                    |

La première mesure des déformations a été effectuée après une demi heure de sectionnement et imprégnation dans les milieux chimiques à l'aide d'une règlette millimétrique transparente et flexible afin d'épouser la forme de l'éprouvette curviligne (figure 1 et 2).



FIG. 1- Règlette millimétrique



FIG. 2- Epreuve de gaz

## 3 Résultats

Les contraintes internes sont les plus fortes juste après leur apparition et donc les plus dangereuses pour les pièces finies. Le fait que les contraintes internes conduisent ou non à des processus de rupture dépend de la résultante des sollicitations extérieures et des contraintes internes qui relaxent au cours du temps. Aucune rupture ne se produit si la somme des contraintes subies par la pièce durant toute sa durée de vie reste, à tout moment, inférieure à la résistance en fluage ou à la durabilité du matériau [7].

La modélisation de ces contraintes et déformations résiduelles obéit à des équations très différentes de celles qui régissent la mise en forme du fondu. Entre deux instants successifs, l'incrément de contrainte  $\Delta\sigma$  et l'incrément de déformation  $\Delta\varepsilon$  sont reliés par l'équation:

$$\Delta\varepsilon = \frac{1+\nu}{E} \Delta\sigma + \left( 3\Delta p \frac{\nu}{E} + \alpha\Delta T \right) l \quad (1)$$

Le coefficient de poisson  $\nu$ , le module de Young  $E$  et le coefficient de dilatation  $\alpha$  dépendent bien entendu de la température, mais ils peuvent dépendre également du temps (phénomène de relaxation), ainsi que de la cristallisation et de l'orientation des macromolécules qui peuvent être hétérogènes entre la peau et le cœur de la pièce [8].

Les résultats des déformations des échantillons en forme d'anneaux sont déterminés à partir du rapport entre la variation du diamètre extérieur de l'éprouvette et le diamètre extérieur initial. La déformation à l'instant  $t = t_i$  est alors exprimée par la relation suivante :

$$\varepsilon_{t_i} = \frac{D_{t_0} - D_{t_i}}{D_{t_0}} \quad (2)$$

Où  $D_{t_0}$  et  $D_{t_i}$  sont le diamètre extérieur de l'éprouvette à l'instant  $t = 0$  (temps initial) et à l'instant  $t = t_i$  respectivement.

On remarque que les courbes des différentes éprouvettes ont la même allure, et les déformations commencent juste après le sectionnement donc à l'instant  $t = t_0$ . Ces courbes ont une allure semblable à celle obtenue pour les courbes typiques de fluage  $\varepsilon = f(t)$  des matériaux viscoélastiques semi-cristallins rencontrés dans la littérature [9, 10].

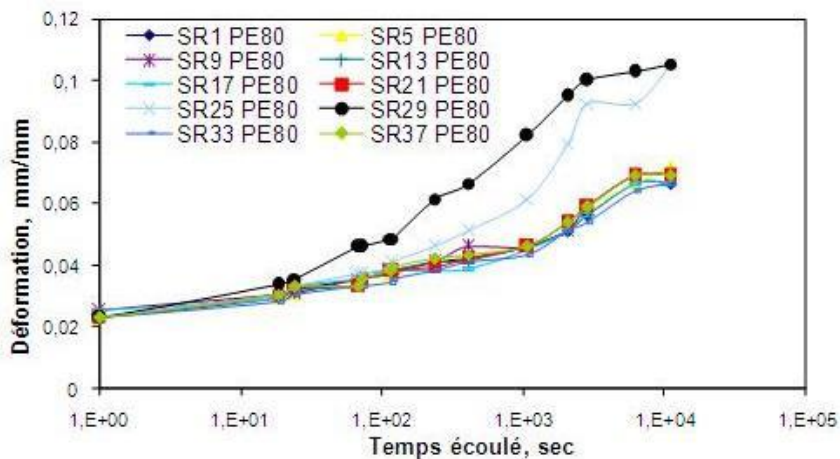


FIG. 3- Evolution des déformations des éprouvettes de tube HDPE 80 à 18 mois imprégnées dans les différents environnements chimiques

Le comportement des éprouvettes sous l'effet des contraintes résiduelles illustré par les courbes de déformation en fonction du temps comme montré dans la figure 3 est décrit par les deux modèles mathématiques suivants qui ont été retenus parmi d'autres modèles:

$$\varepsilon = A \cdot t^n \quad (3)$$

et

$$\varepsilon = B + C \cdot \ln(t) \quad (4) \quad [10]$$

Où  $t$  représente le temps écoulé en secondes alors que  $n$ ,  $A$ ,  $B$ , et  $C$  sont des paramètres propres au matériau polyéthylène obtenus par traitement des déformations mesurées. Les valeurs de ces paramètres pour chaque éprouvette sont données dans le tableau 3. Elles sont obtenues par traitement statistique des résultats de 18 mois d'observation. D'après les coefficients de détermination, il est constaté que la tendance est très bonne. Lors de la mesure du taux de déformation ( $d\varepsilon/dt$ ), qui est défini comme étant la première dérivée de la déformation par rapport au temps. Il a été trouvé que ce dernier diminue avec le temps et tend à s'annuler comme le montre la figure 4.

Il est important de noter aussi que le taux de déformation diminue de manière monotone quand la densité diminue. Donc le taux de déformation diminue quand la densité des molécules de liaison augmente. Les

matériaux les plus résistants à long terme sont ceux qui ont un réseau dense et le moins déformable. La densité du réseau peut être interprétée en termes d'enchevêtrements et de molécules de liaison qui contribuent à sa solidité et sa résistance à la déformation [4].

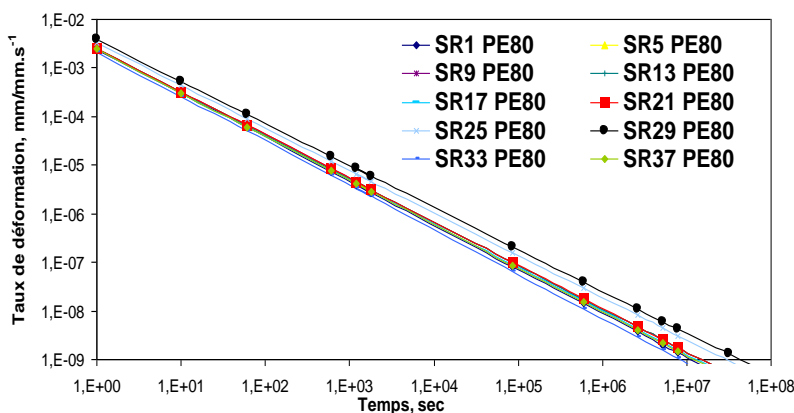


FIG. 4- Variation du taux de déformation des éprouvettes du tube HDPE 80 avec le temps

D'après le tableau 4 qui donne les valeurs de déformations des différentes éprouvettes du tube de gaz, On remarque que :

Le pétrole brut et le Toluène méthanol sont les solvants qui ont un réel effet sur cette résine et marque une valeur très importante de la déformation par rapport aux autres environnements chimiques, ces derniers ont pratiquement le même effet et les valeurs des déformations enregistrées sont plus faibles par rapport aux solvants. Les résultats obtenus montrent un comportement conforme aux informations recueillis dans la littérature pour le polyéthylène [3, 11, 12].

## 4 Conclusion

Dans ce travail, nous avons déterminé l'influence des environnements chimiques sur les réseaux en HDPE de transport et de distribution du gaz naturel.

Les résultats indiquent que le mélange toluène avec méthanol et le pétrole brut sont les plus absorbés par le HDPE et représentent les plus importantes valeurs des déformations et dégradation des propriétés du matériau.

Les courbes  $\varepsilon = f(Ln(t))$  sont caractéristiques d'un comportement de fluage à court terme des matériaux viscoélastiques semi-cristallins.

Le procédé d'attaque chimique des polymères est basé sur la différence de diffusion des agents corrosifs dans les phases amorphe et cristallite. La vitesse de pénétration dans la phase cristallite est en général plus faible dans la direction des chaînes que dans la direction perpendiculaire à celle-ci [13].

## Références

- [1] F. ADDIEGO. Caractérisation de la variation volumique du Polyéthylène au cours de la déformation plastique en traction et en fluage. Thèse de Doctorat, Lorraine, 2006.
- [2] M. Olivier HEHN. Analyse expérimentale et simulation thermomécanique du soudage bout à bout de tubes de Polyéthylène. Thèse de Doctorat, Paris, 2006.
- [3] J-P BAILON, J-M DARLOT, Des Matériaux, Presses Internationales Polytechnique, Montréal, 2004.
- [4] J. CAZENAVE. Sur le compromis rigidité/durabilité du polyéthylène haute densité en relation avec la structure de chaîne, la microstructure et la topologie moléculaire issues de la cristallisation, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [5] D.C. MILES, J.H. BRISTON. Technologie des Polymères, Dunod, Paris, 1968.
- [6] Documentation STPM Chiali, Tubes polyéthylène (PE) et accessoires, Catalogue technique, Sidi Bel-Abbes, 2000.

- [7] G.W. Ehrenstein, F. Montagne. Matériaux Polymères: Structure, Propriétés et Applications, Hermès Science Publications, Paris, 2000.
- [8] M. Carrega et coll, Matériaux polymères, matériaux industriels, Dunod, Paris, 2000.
- [9] S. Rehab Bekkouche et K. Chaoui, Effects of aggressive chemical environments on mechanical properties of polyethylene piping materials, First AIQ-International Conference on Fracture, Alger, 2008.
- [10] N. Kiass, Une nouvelle approche expérimentale pour l'étude de la variabilité des propriétés mécaniques des tubes semi- cristallins HDPE-80, Thèse de doctorat, Annaba, 2005.
- [11] J.P. Mercier et E. Maréchal, Traité des matériaux, Chimie des polymères, Lausanne, 1996.
- [12] N. Kiass et al. Experimental Approach to Mechanical Property Variability through a High- Density Polyethylene Gas Pipe Wall, Journal of Applied Polymer, 2005, Vol. 97, 272-281.
- [13] A. Marquez-Lucero, C. G'Sell, and K. W. Neale, Polymer, 30, 636, 1989.

## Annexe

**Tableau III,** Valeurs des constantes A, B, C et n et obtenues par traitement des résultats de 18 mois pour chaque éprouvette dans les différents milieux chimiques

| Milieu                             | Spécimen  | A      | Exposant n | B      | C      | Coefficient de détermination |                      |
|------------------------------------|-----------|--------|------------|--------|--------|------------------------------|----------------------|
|                                    |           |        |            |        |        | Modèle puissance             | modèle logarithmique |
| 1% Hcl                             | SR1 PE80  | 0,0248 | 0,0958     | 0,0269 | 0,0031 | 0,9715                       | 0,8227               |
|                                    | SR2 PE 80 | 0,0244 | 0,096      | 0,0263 | 0,0031 | 0,9601                       | 0,8028               |
| 10% Hcl                            | SR5 PE80  | 0,0233 | 0,1085     | 0,0261 | 0,0034 | 0,98                         | 0,8209               |
|                                    | SR6 PE80  | 0,0234 | 0,1057     | 0,026  | 0,0033 | 0,981                        | 0,8268               |
| 20% Hcl                            | SR9 PE80  | 0,0239 | 0,1066     | 0,0268 | 0,0033 | 0,9808                       | 0,8311               |
|                                    | SR10 PE80 | 0,0241 | 0,0978     | 0,0262 | 0,0032 | 0,9625                       | 0,8095               |
| 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | SR13 PE80 | 0,0233 | 0,1075     | 0,026  | 0,0034 | 0,9766                       | 0,8142               |
|                                    | SR14 PE80 | 0,0228 | 0,1074     | 0,0253 | 0,0033 | 0,9704                       | 0,7998               |
| 10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | SR17 PE80 | 0,0239 | 0,1021     | 0,0267 | 0,0031 | 0,9724                       | 0,8311               |
|                                    | SR18 PE80 | 0,0257 | 0,0927     | 0,0274 | 0,0032 | 0,9286                       | 0,7844               |
| 20% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | SR21 PE80 | 0,0235 | 0,1078     | 0,0263 | 0,0034 | 0,9791                       | 0,8218               |
|                                    | SR22 PE80 | 0,0229 | 0,105      | 0,0254 | 0,0032 | 0,9734                       | 0,812                |
| Pétrole brut                       | SR25 PE80 | 0,0253 | 0,1277     | 0,028  | 0,0053 | 0,9041                       | 0,6833               |
|                                    | SR26 PE80 | 0,026  | 0,119      | 0,0285 | 0,0048 | 0,9142                       | 0,686                |
| Toluène                            | SR29 PE80 | 0,0282 | 0,1364     | 0,0328 | 0,0061 | 0,9362                       | 0,7572               |
| méthanol                           | SR30 PE80 | 0,0287 | 0,1325     | 0,033  | 0,006  | 0,9353                       | 0,7455               |
| Eau distillée                      | SR33 PE80 | 0,0251 | 0,0858     | 0,0264 | 0,0029 | 0,9206                       | 0,7637               |
|                                    | SR34 PE80 | 0,0245 | 0,0945     | 0,0266 | 0,003  | 0,9712                       | 0,8329               |
| Air libre                          | SR37 PE80 | 0,0249 | 0,0986     | 0,0271 | 0,0033 | 0,9641                       | 0,8088               |

**Tableau IV,** Déformations des éprouvettes de tube HDPE 80 en %

| N° d'éprouvette | SR1 PE80    | SR5 PE80    | SR9 PE80    | SR13 PE80                         | SR17 PE80                          | SR21 PE80                          | SR25 PE80    | SR29 PE80        | SR33 PE80     | SR37 PE80   |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------|------------------|---------------|-------------|
| Milieu chimique | 1% Hcl      | 10% Hcl     | 20% Hcl     | 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 20% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Pétrole brut | Toluene méthanol | Eau distillée | Air         |
| Déformation (%) | <b>6,62</b> | <b>6,87</b> | <b>6,87</b> | <b>6,62</b>                       | <b>6,62</b>                        | <b>6,87</b>                        | <b>10,44</b> | <b>10,44</b>     | <b>6,62</b>   | <b>6,87</b> |