

Simulation numérique de quelques cas réels du comportement viscoélastique des tubes en polyéthylène à haute densité (PEHD)

M. Mendas¹, M. Hadj-Miloud¹, A. Kouadri Boudjelthia¹, I. Zidane²

- ^{1.} Département de mécanique, Faculté de Technologie, Université Hassiba Benbouali de Chlef
- ^{2.} Département de mécanique, Faculté des Sciences et de Technologie, Université de Khemis Miliana

Résumé — Ce travail présente des résultats de calculs numériques des déformations dans les tubes en polyéthylène à haute densité (PEHD). Le comportement tenant compte de la nature viscoélastique de ce matériau a été donc considéré. Un modèle numérique sous le code de calcul commercial Abaqus est développé. Dans ce modèle, différentes méthodes d'introduction des caractéristiques du matériau sont appliquées. Plusieurs chargements et conditions d'installation du tube sont explorés par ce modèle. Les résultats obtenus ont permis de simuler le comportement de tube et d'évaluer sa déformation radiale. L'augmentation de la température fait généralement augmenter les déformations radiales. Dans certains cas leurs évolutions se trouvent inversées.

Mots clés: tube, PEHD, viscoélastique, FEM.

I. Introduction

Aujourd'hui les produits en polyéthylène à haute densité (PEHD) jouent un rôle très important dans les opérations industrielles et dans le quotidien des citoyens. Particulièrement, les tubes en PEHD sont considérablement employés dans les réseaux de distribution et le transport d'eau et de gaz. Pendant le service, ces tubes sont soumis à un certain nombre de charges tels que la pression interne, à la poussée des terres, au déplacement du sol, à la dynamique des liquides et à la variation de la température. Ces conditions qui dépassant parfois leurs limites d'utilisation provoquent, au cours du temps, des déformations plus au moins importantes dans les tubes et influent sur leur performance pendant l'exploitation et réduisent donc leur durée d'utilisation conduit à des opérations de remplacement des tubes parfois coûteuses.

Les propriétés mécaniques du PEHD sont sensibles à un certain nombre de facteurs. Le caractère dominant de ces propriétés est sa viscoélasticité conditionnée par une sensibilité très claire aux taux de déformation. Ce caractère est essentiellement lié à la structure moléculaire des PEHD [1-3]. Dans la plupart des travaux expérimentaux [4-6] les polyéthylènes à haute densité sont caractérisées sous plusieurs conditions opératoires. Les principaux facteurs pris en considération sont : la grandeur et la vitesse de chargement [3], la température ambiante et du liquide transporté [7,8] et les conditions d'élaboration [2] ainsi que les dimensions des produits [1].

L'étude des performances de ces produits nécessite donc plusieurs essais de laboratoire, aboutissant à des comportements généralement très dispersés. L'essai de traction uniaxiale nous permet de déterminer les principales caractéristiques mécaniques de ce polymère tel que le module de Young, la limite élastique, ... Les essais de fluage et de relaxation permettent de montrer son caractère viscoélastique de ce matériau. Comme pour la détermination des modèles rhéologiques décrivant le comportement des PEHD, ces essais indispensables pour la

Corresponding author: Mohammed Mendas, Research field: Mechanical testing, Tribology
Address: BP151, Hay Essalem, Chlef (02000)
E-mail: m.mendas@univ-chlef.dz

construction d'un modèle numérique permettant d'évaluer les contraintes et les déformations dans une situation de chargement donnée.

En effet les résultats trouvés dans ces essais montrent des gammes plus ou moins larges des paramètres tirés à partir des essais, tels que le module d'Young, la limite élastique, le domaine élastique, viscoélastique et plastique. Il convient donc d'utiliser l'outil de la modélisation numérique dans l'étude du comportement des tubes fabriqués en PEHD. Dans la littérature on trouve plusieurs travaux de simulation numérique dans des conditions d'utilisation réelles des tubes en PEHD [9, 10].

Cependant peu de travaux numériques ont traité le caractère viscoélastique de ce matériau dans leurs simulations. Par ces modules d'introduction des propriétés mécaniques et physiques des PEHD [11], le code commercial de calcul Abaqus/Standard a été utilisé à cette fin. Dans ce contexte un modèle numérique a été utilisé pour déterminer les déformations d'origine mécanique et thermique dans un tube soumis à différents chargements. Ce modèle simule les conditions réelles d'utilisation des tubes, en particulier, lorsqu'ils sont soumis aux sollicitations du sol dans lequel est installé.

II. Modèles viscoélastiques pour les PEHD

Dans le cas des polymères semi-cristallins (PEHD), il y a différents comportements des phases amorphe et cristalline. Plusieurs modèles phénoménologiques décrivant le comportement viscoélastique des PEHD en fonction de leur structure sont généralement développés [4]. Parmi ces modèles il y a celui de Maxwell et de Kelvin Voigt. Dans tous les cas de comportement, le module de cisaillement $G(t)$ est représenté par une loi en fonction du temps comme suit :

$$G(t) \equiv \frac{\tau}{\gamma} = f(t) \quad (1)$$

Le modèle de Maxwell, est composé d'un ressort et un amortisseur en série d'un ressort et d'un amortisseur, donne la contrainte en cisaillement par :

$$\tau = \eta\dot{\gamma} - \frac{\eta\dot{\tau}}{G} = \eta\dot{\gamma} - \lambda\dot{\tau} \quad (2)$$

Avec λ étant le temps de relaxation. Le modèle de Maxwell considère que le matériau se comporte comme un fluide qui continue à se déformer tant qu'il est sollicité. La déformation est exprimée par :

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{\eta} + \frac{\tau_0}{G} t \quad (3)$$

Dans le modèle de Kelvin Voigt, les contraintes supportées par chacun de ces éléments s'additionnent (équation (4)). Donc on peut écrire :

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma} \text{ avec } \gamma = \gamma_0 e^{-\frac{G}{\eta}t} + \frac{\tau_0}{G} \left(1 - e^{-\frac{G}{\eta}t}\right) \quad (4)$$

En tenant compte du caractère complexe de la structure des PEHD, ces modèles présentent un certain nombre d'insuffisance. Ces modèles sont donc améliorés par l'ajout à leurs éléments des ressorts de module G_0 . Il est aussi possible de généraliser ces modèles par l'introduction des distributions continue des éléments de Maxwell [4].

Le module de cisaillement $G(t)$ est donc à représenter aussi sous forme d'une loi dite série de Prony en fonction du temps et pour une période donnée. Dans la pratique, en plus des essais de traction axiale, les polymères sont aussi caractérisés par les essais de fluage et de relaxation. Les paramètres du module de cisaillement en fluage $G_f(t)$ ou en relaxation $G_r(t)$ dans la série de Prony seront donc à déterminer à partir de ces deux derniers essais.

III. Modélisation du comportement viscoélastique du PEHD

III.1. Représentation du modèle de comportement viscoélastique par la série de Prony

Le modèle numérique sous Abaqus considère que la composante viscoélastique du matériau est donnée par les modules de cisaillement, G ou de compressibilité, K . Ceux ci sont définis par les séries de Prony indiquées par les relations (5) et (6).

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i \left(1 - e^{-t/\tau_i}\right) \quad (5)$$

$$k(t) = 1 - \sum_{i=1}^N k_i \left(1 - e^{-t/\tau_i}\right) \quad (6)$$

$$\text{Avec : } g_i = \frac{G_i}{G_0} \text{ et } k_i = \frac{K_i}{K_0}$$

Où : N , g_i et k_i sont des constantes du matériau. La substitution dans l'équation de la contrainte conduit à l'expression de la contrainte de cisaillement de l'équation (7) :

$$\tau(t) = G_0(\gamma - \sum_{i=1}^N \gamma_i) = G_0(\gamma - \gamma^{Fl}) \quad (7)$$

Dans cette expression, γ_i est la variable contrôlant la contrainte de relaxation et γ^{Fl} est la déformation de fluage. On remarque bien que la contrainte de cisaillement est donnée en fonction de la différence entre la déformation mécanique totale et la déformation instantanée et donc à partir de la série de Prony on peut écrire :

$$\tau = \tau_0 - \sum_{i=1}^N \tau_i \quad (8)$$

L'équation (8) est utilisée pour modéliser la dépendance en fonction du temps de la contrainte de cisaillement avec le comportement viscoélastique volumique du matériau. Dans une telle modélisation, plusieurs paramètres sont à déterminer à partir des essais de fluage et de relaxation. Pour implémenter le modèle viscoélastique sous Abaqus® les réponses normalisées de fluage et de relaxation sont utilisées [11]. Ces réponses sont obtenues par un intervalle de courte-durée du polynôme et un intervalle de temps suffisamment long pour simuler la réponse à long terme en fluage et en relaxation.

III.2. Procédure de modélisation numérique du comportement viscoélastique

Lors de la modélisation numérique, les propriétés du matériau sont introduites par plusieurs manières. Dans ce travail, les caractéristiques mécaniques du PEHD sont obtenues à partir des résultats expérimentaux des références [4,12]. En plus des propriétés physiques, telles que la densité et le coefficient de dilatation, il est indispensable d'introduire caractéristiques viscoélastique des PEHD. Afin de limiter le temps de calcul, les paramètres de la série de Prony sont distribués sur 5 temps. Les paramètres de relaxation peuvent être définis par :

les spécifications directes des paramètres de série de Prony, de l'inclusion des données d'essai de fluage, de l'inclusion des essais de relaxation. Les effets de température sont introduits de la même manière indépendamment de la méthode employée pour définir le caractère viscoélastique.

La procédure d'introduction de ces caractéristiques est expliquée par la manière suivante :

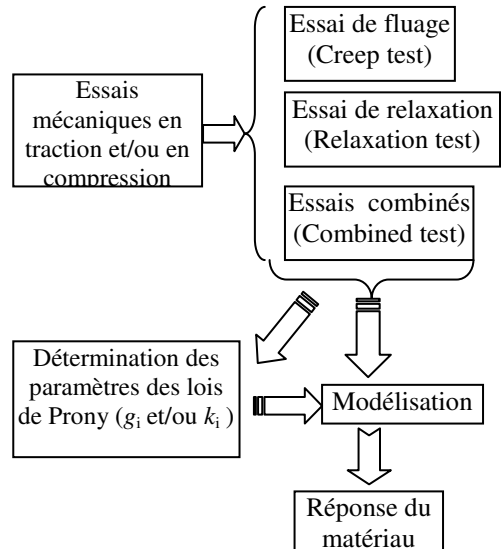


Fig. 1 Organigramme de la procédure d'introduction des propriétés viscoélastique du PEHD par le code de calcul Abaqus.

Les paramètres de série de Prony : g_i , k_i et τ_i peuvent être définis directement pour chaque limite de la série de Prony. Il n'y a aucune restriction au nombre de termes qui peuvent être employés. Les données devraient être saisies dans l'ordre croissant du temps de relaxation. Le nombre de lignes des données définit le nombre de données de la série de Prony, N .

III.3. Maillage et géométrie du tube

Un tube de rayon intérieur r_1 et rayon extérieur r_2 est maillé. Les caractéristiques géométriques du tube sont choisies selon les spécifications réelles des tubes en PEHD commercialisés. Un élément hexaédrique à 8 nœuds (C3D8R) avec une technique structurée (Figure 2) sont choisis pour mailler cette géométrie.

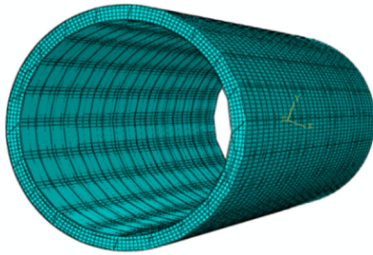


Fig. 2 Maillage du tube.

III.4. Chargement et conditions d'appuis

Pour s'approcher des conditions réelles d'installation des tubes enterrés, deux types de fixation sont adoptés : tube encastré par ces extrémités et tube fixé longitudinalement par ces extrémités. Deux cas de chargement sont modélisés : cas d'un tube soumis à des pressions intérieures et extérieures et un autre cas de pression extérieure appliquée à la moitié supérieure du cylindre (Figure 3).

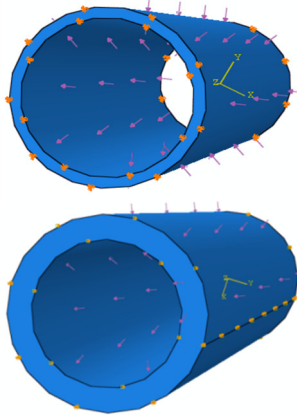


Fig. 3 Chargement et conditions d'installation du tube.

Deux pressions sont choisies, une faible pression de 0.1 MPa (1 bar) et une grande pression de 2.5 MPa (25 bars). Cette dernière valeur présente la pression maximale d'utilisation. Dans le but d'inclure l'effet de la température, deux températures sont aussi choisies de 25 °C et 60 °C.

IV. Résultats numériques et discussion

Les propriétés mécaniques du PEHD sont introduites par la série de Prony. Les paramètres de la série de Prony ont été déterminés à partir des résultats expérimentaux des essais de relaxation tirés de la référence bibliographique [13]. Les

résultats numériques sont analysés en fonction des conditions de chargement, de fixation et de l'effet de la température du liquide transporté. Dans ces résultats, seules les déformations radiales sont exposées. On présente sur la figure 4 les isovaleurs des déformations dans le tube pour le cas d'une fixation encastrée aux deux extrémités (Figure 4-a) et non encastré (Figure 4-b).

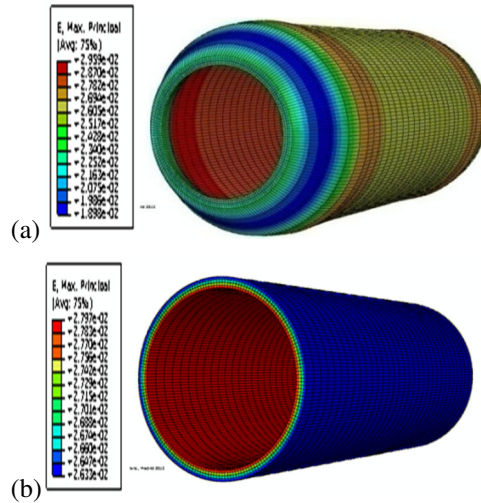


Fig.4 Champ des déformations dans le tube pour $P1=2.5MPa$ et $P2=0.1MPa$: (a) cas de tube encastré, (b) tube non-encastré.

Dans le cas de tube encastré par ces extrémités, on remarque que des déformations plus ou moins importantes des zones de fixation (Figure 4-a). Au milieu du tube les déformations sont moins importantes. Ce résultat montre l'effet du mode de fixation sur les déformations radiales dans le tube. Lorsque le tube n'est que bloqué dans une direction axiale du tube, les grandes déformations réparties le long et à l'intérieur du tube (Figure 4-b). Les évolutions des déformations radiales selon l'épaisseur du tube sont présentées en fonction du paramètre adimensionnel : rapport du rayon considéré (r) au rayon extérieur (r_2) r/r_2 sur la figure 5.

Les déformations radiales obtenues évoluent de la même manière dans les points de fixation et au milieu du tube. Toutefois, on remarque qu'avec l'effet de la température ces déformations diminuent à une certaine valeur du rapport r/r_2 (milieu de l'épaisseur du tube) puis augmentent (Figure 5-a). Dans le cas de calcul sans l'effet de la température, les déformations diminuent avec l'augmentation du rapport r/r_2 . Les mêmes

évolutions de la contrainte et de la déformation sont obtenues au milieu du tube. Dans tous les cas aussi on remarque que la température fait augmenter les valeurs obtenues (Figure 5).

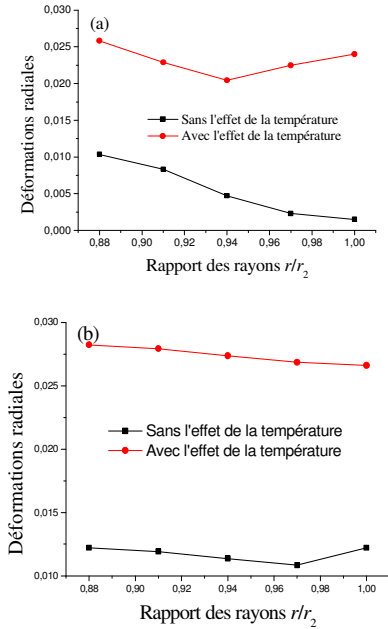


Fig. 5 Déformations radiales (a) aux points de fixation et (b) au milieu du tube pour $P1 = 2.5$ en MPa et $P2 = 0.1$ MPa, tube encastré par ses extrémités.

La figure 6 montre les déformations radiales selon l'épaisseur d'un tube bloqué longitudinalement.

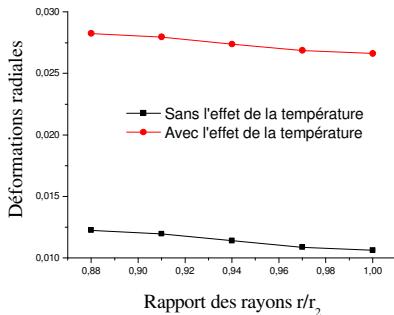


Fig. 6 Déformations radiales dans le cas de tube fixé longitudinalement pour les pressions intérieur $P1 = 2.5$ MPa et extérieur $P2 = 0.1$ MPa.

Les déformations radiales ont la même tendance avec et sans l'effet thermique mais avec des valeurs différentes. L'élévation de la température contribue généralement à les augmenter (Figure 6).

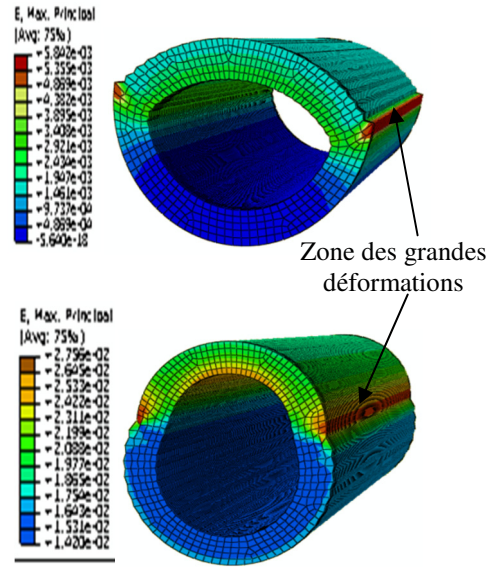


Fig.7 Contour des déformations radiales avec l'effet de la température.

Les mêmes valeurs de déformation obtenues sur la base des différents modèles rhéologiques de la viscoélasticité du PEHD sont très proches. Dans le cas d'un tube fixé axialement, la figure 7 suivante montre le comportement du tube soumis à deux types de chargement. Ce comportement est différent à celui remarqué précédemment (Figure 4).

Dans ce cas de chargement, les grandes déformations sont localisées dans la zone d'application de la pression extérieure et la fixation. Les évolutions des déformations radiales, dans cette zone, en fonction du paramètre adimensionnel r/r_2 et du chargement sont présentées sur la figure 8.

La figure 8 montre que, dans tous les cas, la température augmente les déformations dans le tube. Cependant, l'augmentation de la température et les conditions de chargement font inverser l'évolution des déformations. On comparant les deux cas de modélisation à partir des résultats expérimentaux de fluage (Figure 8-a) et celle à

partir de la construction de la série de Prony (Figure 8-b), on remarque une évolution inversée des contraintes. Ceci est obtenu avec l'effet de la température et avec deux types de chargement. Sans l'augmentation de la température les évolutions de la déformation sont similaires.

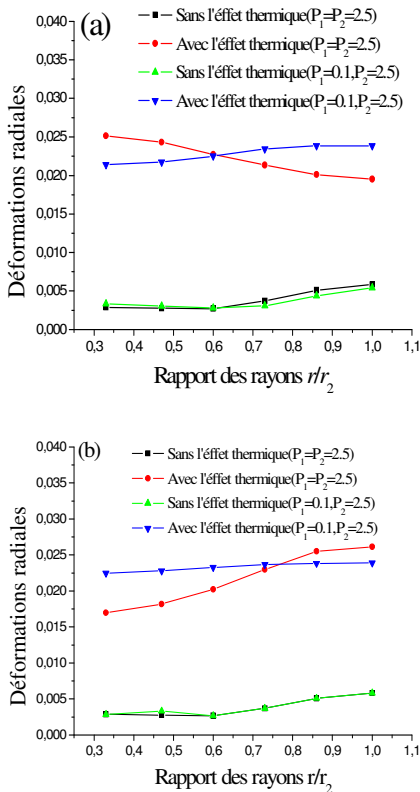


Fig. 8 Déformations radiales, de tube non encastrée et enterré (a) simulation à partir des résultats expérimentaux de fluage, (b) simulation par la série de Prony.

V. Conclusions

A la lumière des résultats numériques obtenus en fonction de l'effet thermique et des conditions de chargement et d'installation des tubes plusieurs remarques peuvent être émises: Le comportement mécanique du tube est modélisé numériquement par des modèles rhéologiques tenant compte du caractère viscoélastique des PEHD.

Les propriétés viscoélastiques des PEHD sont très diverses que leur maîtrise dans les modélisations numériques constituent un outil

adéquat pour ces matériaux. L'augmentation de la température fait généralement augmenter les déformations radiales. Dans certains cas leurs évolutions se trouvent inversées.

Les conditions de fixation et de chargement du tube conduisent à des comportements mécaniques du tube différents.

Références bibliographiques

- [1] D. Gujrati and Arkadii I. Leonov, *Modeling and Simulation in Polymers*(Purushottam WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010).
- [2] I. M. Ward, J. Sweeney, *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*, Second Edition(John Wiley & Sons L, 2004).
- [3] Ch. Carrot et J. Guillet, *Viscoélasticité linéaire des polymères fondus* (AM 3620 - Janv.-1999).
- [4] R. Elleuch and W. Taktak, Viscoelastic Behavior of HDPE Polymer using Tensile and Compressive Loading, *Journal of Materials Engineering and Performance* (2006).
- [5] K.Nitta, H. Maeda, Creep behavior of high density polyethylene under a constant true stress, *Polymer Testing*, 2010.
- [6] N. Dusunceli, O. Umit Colak, The effects of manufacturing techniques on viscoelastic and viscoplastic behavior of high density polyethylene (HDPE), *Materials and Design* (2008).
- [7] E-M. Hoang, D. Lowe, Lifetime prediction of a blue PE100 water pipe, *Polymer Degradation and Stability* (2008).
- [8] M-A. Polak, A. Lasheen, Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling, *Tunnelling and Underground Space Technology* (2002).
- [9] J.A. Cholewa I, R.W.I. Brachman, I.D. Moore, Stress-strain measurements for HDPE pipe during and after simulated installation by horizontal directional drilling, *Tunnelling and Underground Space Technol.*(2010).
- [10] P. Hutar, M. Ševčík, L. Nahlik, G. Pinter, A. Frank, I. Mitev, A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes, *Engineering Fracture Mechani.*(2011).
- [11] *Theory Manual*, Documentation Abaqus 6.11.
- [12] N. Dusunceli-Ozgen. Colak, High density polyethylene (HDPE): Experiments and modeling, *Mech Time-Depend Mater*(2006).