

Effet du cyclage sur le comportement mécanique et la morphologie du polyéthylène haute densité (PEHD 80)

N. HAMLAOUI, L. FATMI

Université du 8 mai 1945 Guelma, 24000 Algérie ;
Laboratoire de Mécanique et Structure;
Faculté des Sciences et de l'Ingénierie, Département de Mécanique.
E-mail hamlaouinacira@yahoo.fr Tél. 0 37 21 58 50, fax 0 37 21 58 50

Résumé:

Les tubes en polyéthylène haute densité (PEHD 80) sont considérablement employés dans la distribution et le transport du gaz naturel. Ces matériaux sont soumis à la pression interne, à la poussée des terres, au déplacement du sol, à la dynamique des liquides. Ces sollicitations provoquent, au cours du temps, des déformations plus au moins considérées dans les tubes et influent sur leurs propriétés mécaniques. Sur ce papier nous présentons une étude expérimentale portant sur l'effet du cyclage du PEHD 80 suivi d'une traction jusqu'à rupture du matériau, à une vitesse donnée et à déplacement imposé pour un nombre de cycles allant de 1 à 10000 et à deux niveaux de chargements d'une part sur le comportement mécanique et d'autre part, sur la morphologie du matériau. Les courbes de comportements mécaniques obtenues montrent que le PEHD 80 présente des boucles hystérésis larges pour les premiers cycles, puis se rétrécissent avec l'augmentation du nombre de cycles. Ainsi le cyclage a conduit à une augmentation considérable du module d'élasticité longitudinal et à l'adoucissement cyclique du matériau. Les observations au microscope optique ont montré une orientation des chaînes macromoléculaires parallèlement à l'axe de traction dont le degré d'alignement est fonction du niveau de chargement.

Mots-clefs : polyéthylène haute densité ; traction cyclique ; adoucissement cyclique ; caractéristiques mécaniques ; morphologie.

Abstract:

High density polyethylene pipes (HDPE 80) are considerably used in the distribution and the transport of natural gas. These materials are subjected to the internal pressure, with pushed grounds, the displacement of the ground, and the dynamics of the liquids. These requests cause, in the course of time, deformations at least considered in the pipes and influential on their mechanical properties. On this paper we present an experimental study about the effect of the cycling of the HDPE 80 followed by a tension until failure of material, at a given speed and imposed displacement for various number of cycles from 1 to 10000 and on two levels of loadings, on the one hand on the mechanical behavior and on the other hand, on the morphology of material. The curves of mechanical behaviors obtained show that the HDPE 80 presents large hysteresis loops for the first cycles which diminishes with increasing number of cycles. Thus cycling led to a considerable increase in the length's modulus of elasticity and to the cyclic softening of material. The observations under the optical microscope showed an orientation of the macromolecular chains parallel to the axis of tension of which the degree of alignment is in function of the level of loading.

Key words: high density polyethylene; cyclic tension; cyclic softening; mechanical characterization; morphology.

1. Introduction

Les tubes en polyéthylène haute densité (PEHD) sont largement utilisés dans la distribution et le transport du gaz naturel. Des statistiques récentes indiquent que plus de 90% des nouveaux réseaux de gaz installés dans le monde sont fait en PE en raison de sa facilité d'installation, aux rapports performances/poids, performances/prix et à la fiabilité à long terme aux agents chimiques. Les propriétés mécaniques des structures tubulaires en PEHD ont fait

l'objet de plusieurs travaux touchant différents aspects, tels que la variation des propriétés physique et mécanique en relation avec la structure moléculaire Hubert et al. (2001), les modes de chargement Hamouda et al. (2001), les mécanismes de rupture Baer (2000), Byoung-Ho et al. (2005) et les effets néfastes d'environnements agressifs Zhou et al. (1996). Des méthodes de caractérisation pour déterminer la résistance à la rupture sous impact et en propagation de fissure sous fatigue ont été développées spécifiquement pour ces types de matériau. Les tubes utilisés dans le transport du gaz sont sous pression durant leurs services. La fluctuation de pression rend souvent la charge plus dynamique. Dans ces conditions, il est utile d'établir la charge maximale à laquelle un tel tube peut résister, sans être déformé ou endommagé pendant toute sa durée de vie (plusieurs décades). Ils sont caractérisés par la résistance hydrostatique à long terme (long-term hydrostatic strength LTHS) ou par la résistance minimale requise (minimum required strength MRS), leur conception est conforme aux normes ASTM D2837 et ASTM D2513.

Le mode de caractérisation le plus courant est l'essai de traction normalisé à vitesse d'allongement constante. Il est cependant bien connu que lorsqu'un solide est soumis à une sollicitation cyclique, la rupture peut se produire pour des valeurs de la contrainte maximale bien inférieure à la charge de rupture et de même à la limite élastique : c'est le phénomène de fatigue. Physiquement, l'application d'une sollicitation cyclique à un solide, matériau plastique compris, conduit à une évolution des processus atomiques et moléculaires variables. L'évolution des structures atomiques et moléculaires lors du cyclage, peut conduire un endommagement microscopique local.

Ce travail traite le comportement mécanique du polyéthylène haute densité grade 80 soumis à la traction cyclique, ayant pour but de voir l'influence du nombre de cycles et le niveau de chargement d'une part sur les caractéristiques mécaniques et d'autre part sur la morphologie de ce matériau.

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 naturel supportant une pression nominale en service de 4 bars, ils sont de fabrication algérienne (Sotuplast chlef). Le polyéthylène haute densité c'est un thermoplastique dérivé des hydrocarbures, réalisé par polymérisation d'addition, il est transformé par extrusion, d'une masse volumique d'environ 0.95 à 0.98 g/cm³, d'indice de fluidité 0,75 g/10 min à 190°C et de teneur en noire de carbone de 2,0 à 2,6%. Le polyéthylène haute densité est semi cristallin avec un taux de cristallinité d'environ 73 à 82% en volume, sa température de transition vitreuse (Tg) est de -125° C et sa température de fusion est de 137° C.

Les éprouvettes d'essais de fatigue sont découpées à partir de tubes en PEHD80 de diamètres extérieur 40mm et intérieur 32mm, dans le sens parallèle à l'extrusion, sans chauffage ni aplatissement en utilisant un emporte pièce, conformément à la norme NF T54 – 074, la forme et Les dimensions sont reportées successivement sur les figures (1) et (2).

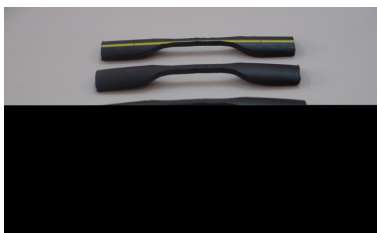


Figure 1. Forme des éprouvettes.

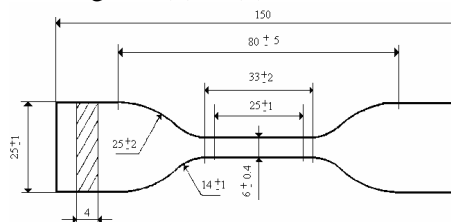


Figure 2. Dimensions normalisées des éprouvettes.

2.2 Essais de fatigue

Des essais de fatigue ont été effectués sur une machine d'essai universel de type ZWICK ROELLE Z005, d'une capacité de 5 KN, pilotée par un ordinateur dont le traitement des résultats est effectué à l'aide du logiciel testxpert.

Des séries d'essais cycliques à vitesse constante de 10 mm/min en déplacement imposé pour différents nombres de cycles allant de 1 à 10000 cycles et pour deux niveaux de chargements 50% et 70% de ΔL_{se} , chaque essai de la série est poursuivi par une traction jusqu'à rupture. La fréquence de cyclage est maintenue constante pour une valeur de 2 Hz. Il est à noter qu'avant de cycler le matériau nous avons procédé à un essai de traction simple dans le but de voir l'influence du mode de chargement d'une part sur le comportement mécanique et d'autre part sur les propriétés mécaniques de ce matériau, tout en conservant la vitesse d'essai (10 mm/min). Pour étudier l'influence du cyclage sur la morphologie du matériau, des observations au microscope optique ont été faites.

3. Résultats et discussion

Le comportement mécanique du PEHD 80 sous une sollicitation de traction statique est présenté par la courbe charge-allongement à vitesse constante figure (3). Le module d'élasticité est calculé dans un intervalle de déformation de [0,05-0,25] % selon la norme ISO 527-1: 1993 (F). Le tableau 1 regroupe les valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques.

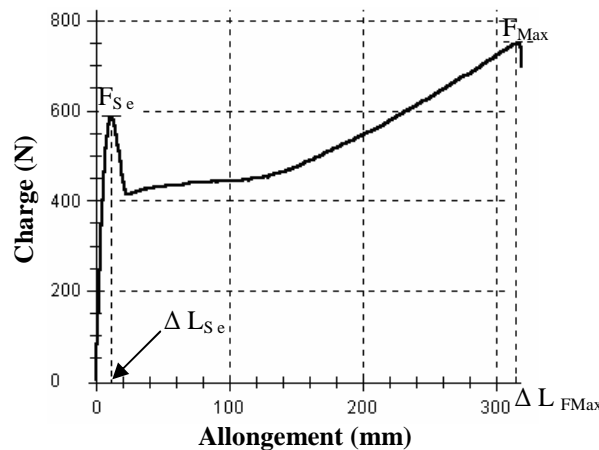


Figure 3. Courbe de comportement expérimental charge-allongement du PEHD 80 en traction statique (Pour $V = 10$ mm/min).

E (N/mm ²)	F_{Se} (N)	ΔL_{Se} (mm)	F_{Max} (N)	ΔL_{FMax} (mm)
163	585	11,8	750,07	317,02

Tableau 1. Valeurs des caractéristiques mécaniques expérimentales du PEHD 80.

Les figures (4) et (5) montrent le comportement mécanique du PEHD 80 soumis à la traction cyclique pour deux niveaux de chargement respectivement 50% et 70% de ΔL_{se} . Ces courbes illustrent que le polyéthylène haute densité a un comportement élastique comme la plupart des polymères pendant le chargement cyclique, ce résultat est semblable à celui cité dans la littérature MEYER, PRUITT (2001). Il se traduit par une boucle hystérésis large pour le premier cycle puis, elle se rétrécit avec l'augmentation du nombre de cycles.

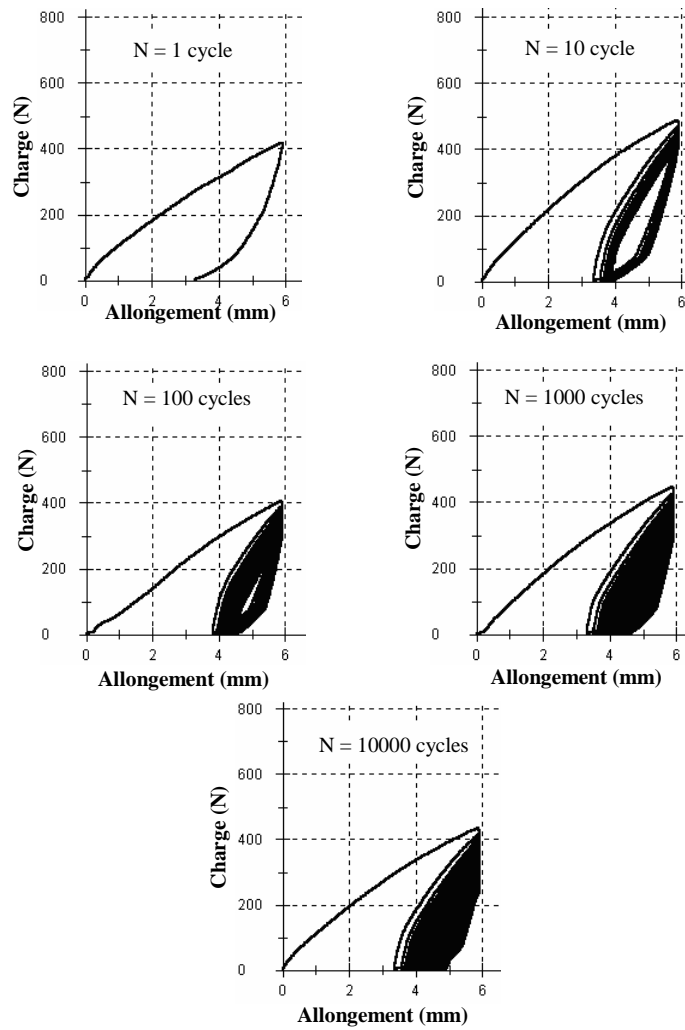
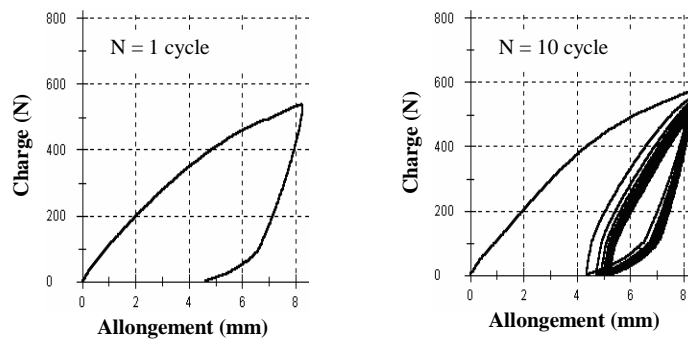


Figure 4. Courbes de comportement expérimental charge-allongement du PEHD 80 en traction cyclique (Pour $V = 10 \text{ mm/min}$ et $N_{\text{chargement}} = 50\% \Delta L_{Se}$).



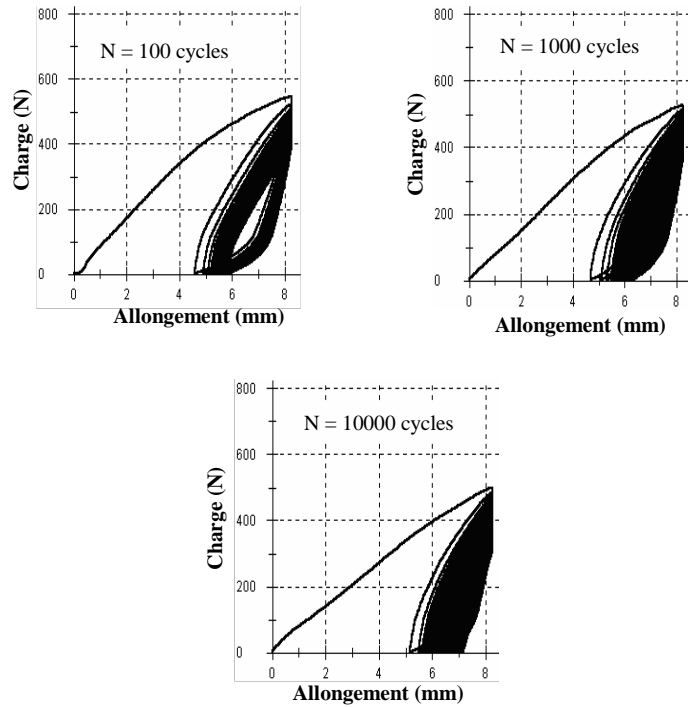


Figure 5. Courbes de comportement expérimental charge-allongement du PEHD 80 en traction cyclique (Pour $V = 10 \text{ mm/min}$ et $N_{\text{chargement}} = 70\% \Delta L_{S e}$).

La figure (6) illustre l'évolution de la charge au cours du cyclage en fonction du nombre de cycles. Elle montre que le matériau étudié a subi un adoucissement cyclique dès les premiers cycles, et diminue progressivement pour les cycles suivants. Au-delà de 1000 cycles une stabilité apparente est relevée. Cette constatation est valable pour les deux niveaux de chargement.

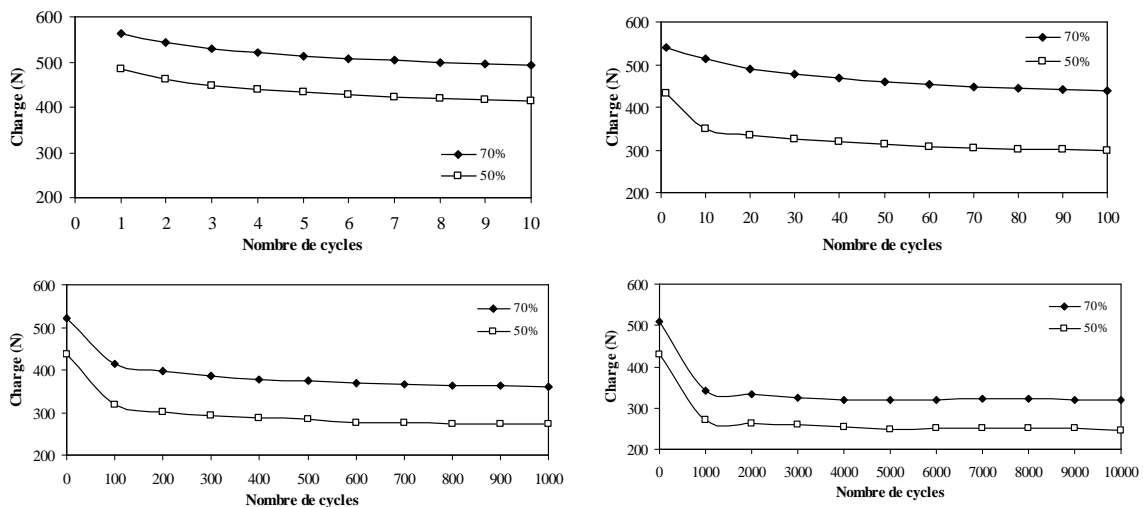


Figure 6. Variation de la charge de cyclage en fonction du nombre de cycles du PEHD 80 (Pour $N_{\text{chargement}} = 50\%$ et $70\% \Delta L_{Se}$).

Le tracé du module d'élasticité longitudinal en fonction du nombre de cycles représenté figure (7) montre une augmentation de trois fois le module initial dès le premier cycle. Cette variation peut être attribuée à l'augmentation de l'alignement des lamelles et à l'évolution de la morphologie du matériau MEYER, PRUITT (2001). Ce phénomène trouve aussi une explication dans les proportions des liaisons covalentes parallèles à la direction de la sollicitation qui augmentent, ce qui entraîne une augmentation considérable du module d'élasticité ASHBY, JONES (1991).

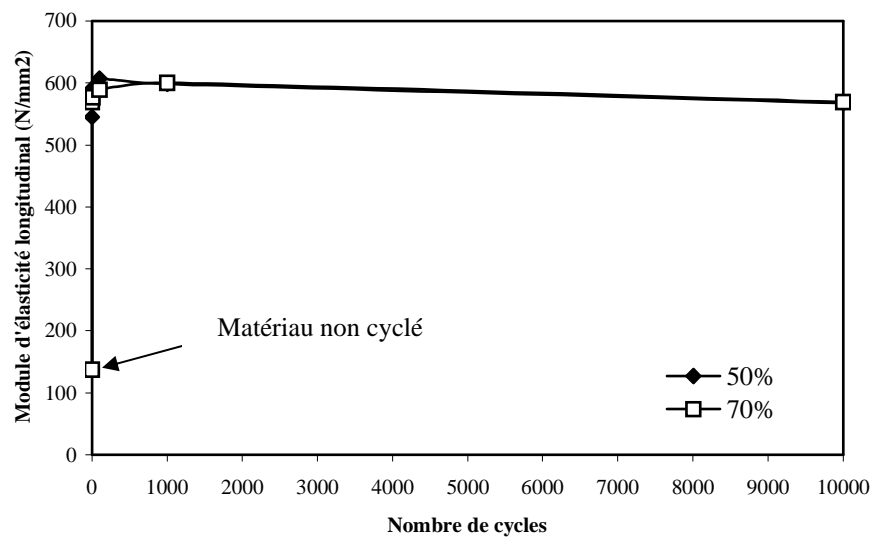


Figure 7. Variation du module d'élasticité longitudinal du PEHD 80 en fonction du nombre de cycles (Pour $N_{\text{chargement}} = 50\%$ et $70\% \Delta L_{Se}$).

Les observations au microscope optique de la structure du PEHD 80 saine et cyclée montrées successivement sur les figures (8) et (9) à différents niveaux de chargement et à différents nombres de cycles illustrent une orientation des lamelles dans le sens de la direction de traction. Le degré croissant de l'alignement est remarquable pour les éprouvettes cyclées à 100 fois. L'augmentation du niveau de chargement entraîne une augmentation du degré d'alignement des lamelles principalement pour le niveau 70% figure (9f). Les figures (8d) et (9h) montrent qu'à 1000 cycles la structure se réorganise en paquets de lamelles moins denses est bien orientés par comparativement à la structure non cyclée.

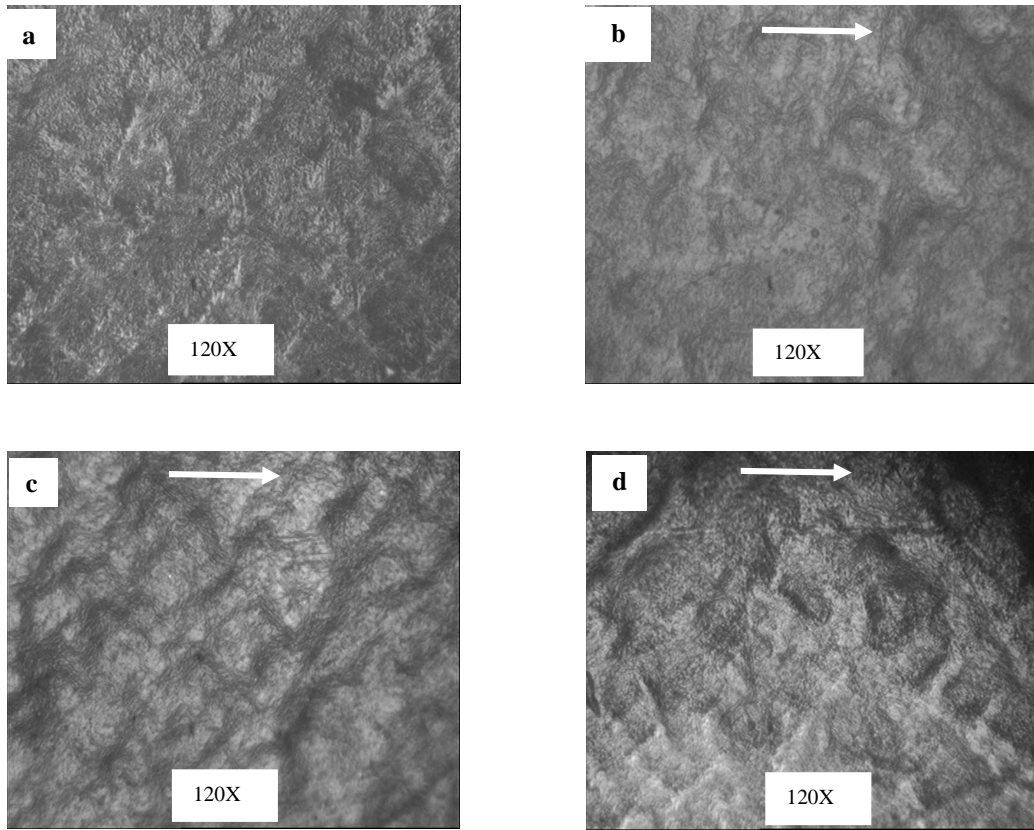
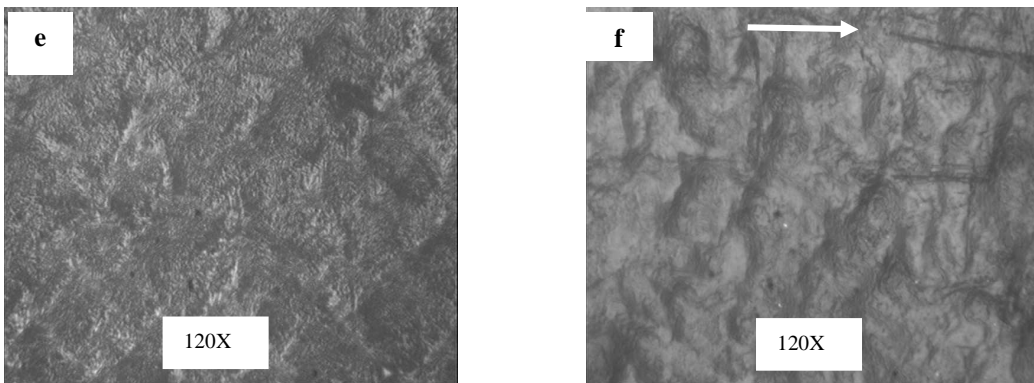


Figure 8. Structures du PEHD 80: (a)saine, (b) 1cycle, (c) 100 cycles et (d) 1000 cycles (Pour $N_{\text{chargement}} = 50\% \Delta L_{Se}$).



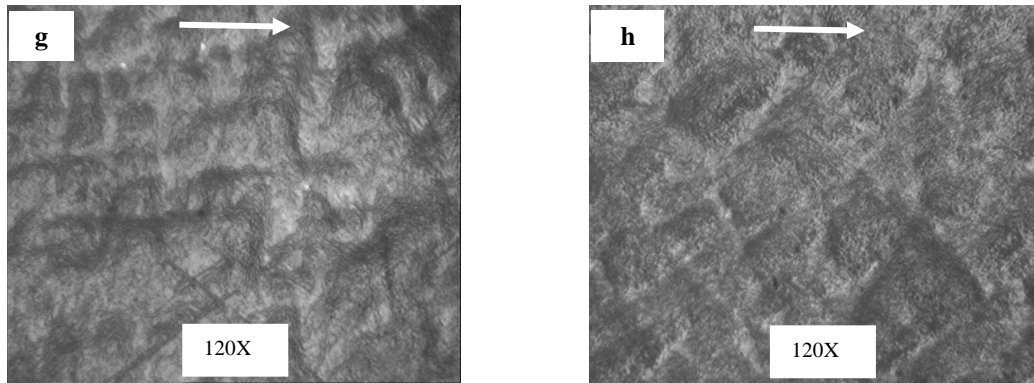


Figure 9. Structures du PEHD 80 (e) saine, (f) 1cycle, (g) 100 cycles et (h) 1000 cycles (Pour $N_{\text{chargement}} = 70\% \Delta L_{Se}$).

4. Conclusion

Cette étude entre dans le cadre de la contribution à la connaissance du comportement mécanique expérimental du Polyéthylène haute densité soumis à des sollicitations de fatigue. Le cyclage du PEHD80 a conduit à une augmentation considérable du module d'élasticité dès les premiers cycles, un adoucissement cyclique du matériau au moins pour les 1000 premiers cycles a été observé suivi d'une stabilité cyclique au-delà de ce nombre.

Les observations au microscope optique ont illustré une orientation des lamelles cristallines parallèlement à l'axe de l'étirement, dont le degré d'alignement est fonction du niveau de chargement néanmoins pour les 1000 cycles traités.

Références

- L. Hubert et all (2001), *Physical and mechanical properties of polyethylene for pipes in relation to molecular architecture. I. Microstructure and crystallization kinetics*, Polymer.42. 8425-8434.
- H. B. H. Hamouda et all (2001), *Creep damage mechanisms in polyethylene gas pipes*, Polymer.42. 5425-5437.
- Baer (2000), *effect of strain rate* JMSc. 35. 1857-1866.
- Byoung-Ho et all (2005), *Fracture initiation associated with chemical degradation: observation and modelling*, Int. J. of Solids and Structures.42. 681-695.
- Y. Zhou, X. Lu, Z. Zhou and N. Brown (1996), *The relative influence of molecular structure on brittle fracture by fatigue and under constant loads in polyethylene*, Polymer Eng. And Science. Vol. 36. N° 16. 2101-2107.
- R. W.MEYER, L. A. PRUITT (2001), *The effect of cyclic true strain on the morphology, structure, and relaxation behavior of ultra high molecular weight polyethylene*, Polymer. 42. 5293-5306.
- M.F. ASHBY, D.RH. JONES, *Matériaux 2, Microstructure et mise en œuvre*, Dunod Paris1991.