



UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

THESE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE**

*Discipline* : **MECANIQUE DES SOLIDES, GENIE MECANIQUE, PRODUCTIQUE,  
TRANSPORT ET GENIE CIVIL**

*Spécialité* : **MECANIQUE**

Présentée et soutenue publiquement

Par

**Ngoc Giang TRAN**

le 09 juillet 2015

**Etude expérimentale et numérique de l'influence des  
interactions contenant/contenu sur le comportement élasto-  
viscoplastique d'emballages en polyéthylène haute densité**

**JURY**

|           |  |                     |
|-----------|--|---------------------|
| M. NOUARI | Université de Lorraine                 | Président           |
| X.L. GONG | Université de Technologie de Troyes    | Rapporteur          |
| L. DING   | Université de Technologie de Compiègne | Rapporteur          |
| F. ABBES  | Université de Reims Champagne-Ardenne  | Encadrante de thèse |
| Y.Q. GUO  | Université de Reims Champagne-Ardenne  | Directeur de thèse  |
| B. ABBES  | Université de Reims Champagne-Ardenne  | Directeur de thèse  |

# Remerciements

Cette thèse a été réalisée dans l'équipe MPSE du laboratoire GRESPI (Groupe de Recherche en Sciences Pour l'Ingénieur) de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

Tout d'abord, je remercie M. Ying-Qiao GUO, directeur de thèse, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire. Je le remercie également pour sa disponibilité durant toute la période de la thèse, ainsi que ses soutiens et bons conseils par sa connaissance profonde et son attitude scientifique.

Bien entendu, je remercie chaleureusement mon co-directeur de thèse M. Boussad ABBES pour tout ce qu'il m'a apporté durant ma présence en France, tant sur le point de vue scientifique que personnel. Son enthousiasme, sa motivation pour le travail et son dévouement m'ont encouragé à surpasser les difficultés de la recherche.

Je voudrais envoyer un grand merci à Mme. Fazilay ABBES pour avoir contribué à ce travail de thèse, pour son aide précieuse tout au long de la thèse et ses remarques pertinentes.

Je tiens à remercier bien Mme Nathalie CHOISELLE et M. Philippe DONY de l'ESIREims pour leur aide et conseils pour la partie expérimentale.

J'adresse ma profonde gratitude à Messieurs Xiao-Lu GONG, Professeur à l'Université de Technologie de Troyes et Luhui DING, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Mes remerciements vont également à M. Mohammed NOUARI, Professeur à l'Université de Lorraine pour l'intérêt qu'il porte à mon travail en présidant mon jury de thèse.

Ce travail n'aurait jamais abouti sans soutien financier, je tiens donc à remercier chaleureusement le Gouvernement Vietnamien pour la bourse principale et le Gouvernement Français pour la couverture sociale.

Je n'oublie pas également de remercier les autres doctorants du laboratoire notamment Minh, Ayao, Moussa, Yassine, Thomas,... avec qui j'ai partagé le bureau et qui m'ont aidé à améliorer la langue Française.

Enfin, mes chaleureuses pensées à ma famille, en particulier mes parents, ma femme, Nhu Trang, mes deux fils, Gia Minh et Gia An, mes grandes sœurs et mon petit frère qui m'accompagnent par leur stimulation et leur affection tout au long de mon séjour en France.

Je vous remercie encore une fois et merci à tous !



# Table des matières

## Remerciements

## Table des matières

## Introduction générale ..... 1

## Chapitre I : Etude bibliographique ..... 6

### I.1 Introduction ..... 6

### I.2 Les interactions contenant/contenu ..... 7

#### I.2.1 Migration ..... 8

#### I.2.2 Perméabilité ..... 9

#### I.2.3 Sorption ..... 10

### I.3 Conséquences des interactions contenant/contenu sur les emballages ..... 12

### I.4 Modélisation de la diffusion..... 13

### I.5 Comportement mécanique des polymères..... 15

#### I.5.1 Micro-mécanismes de déformation ..... 15

#### I.5.2 Comportement plastique macroscopique des polymères semi-cristallins ..... 18

#### I.5.3 Modélisation du comportement mécanique des polymères solides ..... 20

### I.6 Conclusion..... 25

## Chapitre II : Etude expérimentale ..... 28

### II.1 Introduction..... 28

### II.2 Matériaux et méthodes expérimentales..... 28

#### II.2.1 Produit simulateur ..... 28

#### II.2.2 Les flacons en polyéthylène haute densité (PEHD) ..... 29

#### II.2.3 Préparation des éprouvettes ..... 32

### II.3 Techniques de caractérisation expérimentale ..... 35

#### II.3.1 Conditions de contact et essais de vieillissement ..... 35

#### II.3.2 Technique gravimétrique ..... 36

#### II.3.3 Technique de spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier ..... 37

|   |            |
|---|------------|
| II.3.4 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)   | 39         |
| II.3.5 Essais de traction   | 40         |
| II.3.6 Essais de compression sur les flacons  | 42         |
| II.3.7 Analyse mécanique dynamique (DMA)  | 44         |
| II.4 Résultats expérimentaux .....  | 45         |
| II.4.1 Résultats de sorption par gravimétrie  | 45         |
| II.4.2 Résultats de la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier                                      | 49         |
| II.4.3 Résultats de l'analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC)                                  | 53         |
| II.4.4 Résultats des essais de traction   | 56         |
| II.4.5 Résultats des essais de fluage en traction   | 60         |
| II.4.6 Résultats des essais de compression statique sur les flacons   | 63         |
| II.4.7 Résultats des essais de fluage en compression sur les flacons  | 65         |
| II.5 Conclusion .....   | 66         |
| <b>Chapitre III : Modélisation des transferts de masse et du comportement mécanique du PEHD vieilli .....</b> | <b>70</b>  |
| III.1 Introduction .....  | 70         |
| III.2 Identification du coefficient de diffusion dans le PEHD.....  | 70         |
| III.3 Simulation de la diffusion dans les flacons en PEHD.....  | 75         |
| III.4 Modélisation du comportement mécanique statique du PEHD vierge.....                                     | 79         |
| III.4.1 Identification du modèle élasto-viscoplastique du PEHD vierge   | 79         |
| III.4.2 Analyse de sensibilité des paramètres du modèle élasto-viscoplastique                                 | 82         |
| III.5 Modélisation du comportement mécanique statique du PEHD vieilli .....                                   | 85         |
| III.6 Simulation de la compression verticale des flacons en PEHD vieillis .....                               | 88         |
| III.7 Modélisation du fluage du PEHD vierge.....  | 92         |
| III.8 Modélisation du fluage du PEHD vieilli .....  | 97         |
| III.9 Conclusion .....  | 98         |
| <b>Conclusion générale et perspectives.....</b>   | <b>101</b> |
| <b>Références bibliographiques.....</b>   | <b>105</b> |

**Liste des figures ..... 113**

**Liste des tableaux ..... 117**

**Résumé**

**Abstract**



## Introduction générale

Les emballages sont présents dans tous les secteurs industriels : agro-alimentaire, cosmétique, pharmacie, produits d'entretien, produits chimiques, transport, distribution...etc. Ils ont pour rôle d'assurer la protection et la préservation des produits qu'ils contiennent. En effet, ils permettent d'éviter les pollutions et les contaminations extérieures que pourraient subir les produits emballés, contribuant ainsi au maintien de la qualité et de la sécurité de ces produits.

Les matériaux plastiques sont peu coûteux, légers, résistants aux contraintes mécaniques et faciles à mettre en œuvre. Cependant, au contact d'un produit, des transferts de masse se produisent du matériau d'emballage vers le produit (phénomène de migration) et/ou du produit vers le matériau (phénomène de sorption). Ces deux phénomènes peuvent avoir des conséquences néfastes sur le système emballage/produit. Les conséquences sur le produit emballé peuvent être de nature toxicologique ou organoleptique. Les interactions peuvent provoquer le vieillissement physique des polymères d'emballage qui se traduit par une altération lente et irréversible des propriétés du polymère (changement de cristallinité, diminution de la résistance mécanique de l'emballage, déformation irréversible voire endommagement de l'emballage). Il s'ensuit alors une diminution de la qualité et donc une dégradation de l'image de marque de l'entreprise. Les industriels se voient alors dans l'obligation de faire de la sur-qualité sur leurs emballages, avec des surcoûts de fabrication et de transport non négligeables.

Notons par ailleurs que des sollicitations mécaniques peuvent apparaître lors du stockage, du transport ou de la manipulation des emballages. Celles-ci peuvent induire des déformations irréversibles. Le vieillissement peut également affecter l'aspect (brillance, couleur, dégradation profonde de la surface), et les caractéristiques mécaniques de l'emballage (résistance à la compression verticale, tenue au choc etc...).

La démarche adoptée par les industriels pour pallier ce problème consiste à réaliser des tests de compatibilité entre l'emballage et le produit avant la mise sur le marché. Le principe est de réaliser en laboratoire des tests de vieillissement standards (à température ambiante) ou accélérés (températures comprises entre 40°C et 45°C) en mettant en contact les emballages

avec le produit. Des analyses régulières sur le produit et les emballages permettent de valider le couple contenant/contenu avant le lancement industriel. Si les tests s'avèrent négatifs, l'emballage est alors modifié en changeant de polymère, en modifiant la forme de l'emballage, ou en augmentant les épaisseurs, quitte à faire de la sur-qualité. Ces étapes peuvent être longues et coûteuses pour les industriels.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie expérimentale et numérique pour étudier le phénomène de diffusion (ou sorption) et d'en caractériser et modéliser les conséquences sur des flacons en polyéthylène haute densité (PEHD).

Ce manuscrit a été structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique non exhaustive présentant les interactions contenant/contenu et leur modélisation, ainsi que les lois de comportement des polymères et plus particulièrement le polyéthylène haute densité.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale et à la caractérisation du phénomène de sorption – diffusion du produit simulateur choisi dans le cadre de cette thèse. On y présente notamment les matériaux étudiés, les différentes techniques expérimentales utilisées dans ce travail de thèse et les principaux résultats expérimentaux obtenus ainsi que leur analyse. Ces derniers concernent la sorption d'une solution modèle d'acétate d'amyle et le comportement mécanique du polyéthylène haute densité vieilli dans cette solution.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation numérique du transfert de masse dans le polyéthylène haute densité, du comportement statique et en fluage du polyéthylène haute densité en fonction du vieillissement dans la solution d'acétate d'amyle. Les méthodes d'identification des paramètres des modèles proposés et leur implémentation dans le code de calcul ABAQUS sont détaillées. Les comparaisons des résultats numériques et expérimentaux sont présentées et analysées.

Une conclusion générale rappelant les principaux résultats obtenus, et quelques perspectives qui nous semblent intéressantes, viennent enfin clore ce manuscrit.

