

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

*Modélisation par éléments finis des
polymères HDPE*

Présenté par :

❖ BENCHENDIKH SALAH EDDINE OUSSAMA

❖ BOUGUERBA HALIMA

Soutenu le 13 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Président Dr.Khiat Sidi Med Amine Université de Mostaganem UMAB

Examineur Dr.Zaoui Fatima Zohra Université de Mostaganem UMAB

Encadreur Pr. ZENASNI Ramdane Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

Nous remercions « ALLAH » de nous avoir donné la possibilité, la volonté et surtout le courage de satisfaire mon souhait et de mener ce travail à terme.

Nous remercions également Monsieur le président pour avoir accepté de présider ce jury et pour avoir accepté d'examiner ce travail

Nos remerciements les plus sincères, les plus chaleureux et les plus vifs à notre encadreur Monsieur ZENASNI RAMDANE pour ses conseils, sa disponibilité et ses orientations qui nous ont aidés à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur le Chef de département de génie mécanique

Nous remercions, très vivement, l'ensemble des enseignants de la faculté FST de l'université de Mostaganem et de manière exceptionnelle ceux du département de génie mécanique

Nous n'oublions pas nos amis les étudiants de la faculté et tous ceux qui de loin ou de près ont contribué.

DEDICACE

A mon cher futur mari (hachachatkalbi)

A mon frère rabienaeeme et mes sœurs Lakhdari Khadija, Nassima chawia et Rania nsibti

A ma petite belle famille salima, moussa et amine

A mon amie qui a partagée avec moi l'honneur de la réalisation de ce travail sallah eddine

Oussama

A tout le groupe de thérapie spirituelle (Abo Tarik Al arar , MoetazMatar , Mohammed Belbassili, Salah eldinnealnamiss, mohammed wakil ,Mohammed Ghannay, Mohammed All Imrani , Anirade Rachid ,abdallatife, El zahra, Faeela, Fatiha Almachri , Sooha, Malika Z.Ame et Imene , I, Asmae, Abida, Naziha ,Ikram, Kaoutar, Linda, Oum Touka , Oum Ikram , Aicha Om Imrane ,Rokaya , RulaAldarwish , Sama , Oum Haroune , Wafae , Salma SirageElfaiz , Hajer , Rajae , M. Alnaghmouchi , Hayat A, Maryem , Mounia .Djamila , N.Aya , Bouchra Elkihal , Sabrine , Salwa Mabrouk , Kaoutar Zerouli Oum Laith , Souad , Razane , Nadia , Zayneb , Racha , Amina.

A la famille bouguerba et bouroubey

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant mes études

A toutes mes amies et collègues de la promotion 2021-2022.

BOUGUERBA HALIMA

Au nom du Dieu clément et miséricordieux

Je dédie cet humble travail à

MES CHERS PARENTS

*POUR QUI JE DEVINE CE QUE JE SUIS AUJOURDUI QUE DIEU LE TOUT PUISSANT VOUS
PRESERVE ET VOUS PROCURE UNE SANTE ET UNE LONGUE VIE*

À tous mes enseignants

POUR LEUR CONTRIBUTION A CETTE FORMATION ET LEUR BIENVEILLANCE

*ET POUR TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUE DE PRES OU DE LOIN DANS LA
REALISATION DE CE TRAVAIL*

MERCI

BENCHENDIKH SALAH EDDINE OUSSAMA

RÉSUMÉ

Mémoire de fin de cycle a pour objet la modélisation par éléments finis le comportement mécanique d'un polymère en l'occurrence le polyéthylène haute densité. Ce matériel est spécialement utilisé dans l'industrie de transport du gaz naturel. Des essais de simulation numérique ont été alors effectués, il s'agit de l'essai de traction pure avec différents pas de chargement, suivi de l'essai de fluage, les résultats obtenus montrent qu'en augmentant la charge appliquée, le déplacement et les contraintes augmentent de façon linéaire, afin d'avoir un modèle analytique représentant les résultats numériques, le code Mcalibration est utilisé, il dispose d'une librairie de modèle spécialement pour les polymères.

Mots clés : éléments finis, polymère, traction, fluage, Polyéthylène.

ملخص

تهدف أطروحة نهاية الدورة إلى نمذجة السلوك الميكانيكي للبوليمر بواسطة عناصر محدودة، في هذه الحالة البولي إيثيلين عالي الكثافة. تستخدم هذه المواد بشكل خاص في صناعة نقل الغاز الطبيعي. ثم أجريت اختبارات المحاكاة العددية؛ هذا هو اختبار الشد النقي بخطوات تحميل مختلفة، يليه اختبار الزحف. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن زيادة الحمل المطبق والإزاحة والضغوط تزداد خطياً. من أجل الحصول على نموذج تحليلي يمثل النتائج العددية، يتم استخدام رمز Mcalibration. يحتوي هذا الرمز على مكتبة نمذجة مخصصة للبوليمرات.

الكلمات المفتاحية: العناصر المحدودة، البوليمر، الجر، الزحف، بولي إيثيلين .

Abstract

The end of cycle dissertation aims to model finite elements the mechanical behavior of a polymer, in this case high density polyethylene. This material is especially used in the natural gas transport industry. Numerical simulation tests were then carried out; this is the pure tensile test with different loading steps, followed by the creep test. The results obtained show that increasing the applied load, the displacement and the stresses increases linearly. In order to have an analytical model representing the numerical results, the Mcalibration code is used. This code has a model library specifically for polymers.

Keywords: finite elements, polymer, traction, creep, Polyethylene.

Sommaire

Remerciements	I
RÉSUMÉ	IV
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 LES POLYMERES	5
I.2.1 Les thermoplastiques (les polymères industriels).....	5
I.2.2 Les thermodurcissables	6
I.2.3 Les élastomères	6
I.3 CLASSIFICATION DES POLYMERES	7
I.4 LA POLYMERISATION.....	7
I.5 LES DIFFÉRENTS TYPES DE PLASTIQUES.....	7
I.6 LA FABRICATION DES POLYMÈRES ET MATIÈRES PLASTIQUES.....	8
I.7 IMPORTANCE ECONOMIQUE	8
I.8 DOMAINE D'UTILISATION DES POLYMERES.....	8
I.9 POLYÉTHYLÈNE (HDPE).....	9
I.10 UTILISATIONS DU POLYÉTHYLÈNE (HDPE).....	10
I.11 CARACTÉRISTIQUES DU POLYÉTHYLÈNE (HDPE).....	10
I.12 LES PRINCIPAUX AVANTAGES DU (HDPE).....	12
I.13 LES INCONVENIENTS (HDPE).....	12
I.14 LES APPLICATIONS DU (HDPE).....	12
I.15 QUAND OPTER POUR DU (HDPE).....	12
I.16 LES MODELES THEORIQUES	13
Chapitre II	14
II.1 ESSAI DE TRACTION.....	15

II.1.1	Définition.....	15
II.1.2	Principe de traction.....	15
II.1.3	La simulation utilisée	15
II.1.4	Normalisation d'éprouvette	16
II.1.5	Les côtés éprouvette	17
II.1.6	Convergence.....	17
II.1.7	Les résultats de la simulation de l'essai de traction.....	18
II.2	ESSAI DE FLUAGE	21
II.2.1	Définition.....	21
II.2.2	Le modèle utilisé	21
II.2.3	Paramètres de fluage.....	21
II.2.4	Step (Pas).....	22
II.2.5	Les résultats de la simulation de l'essai de fluage.....	22
II.3	La comparaison des résultats de la traction et de fluage	24
II.3.1	Le déplacement.....	24
II.3.2	La réaction RF	25
II.3.3	Les contraintes.....	25
II.4	CALIBRATION	26
II.5	CONCLUSION	27
	CONCLUSION GÉNÉRALE	28
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	29

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1) : Structure de thermoplastique et thermodurcissable. [3]	6
Figure (I.2) : Symbole de recyclage du plastique HDPE. [8]	9
Figure (I.3) : Modèle Bergström-Boyce (BB). [9]	13

Chapitre II

Figure (II. 1) : Géométrie d'éprouvette de HDPE	16
Figure (II. 2) : Les côtés d'éprouvette	17
Figure (II. 3) : Maillage des éléments finis	18
Figure (II. 4) : Paramètres de fluage.	21
Figure (II. 5) : Comparaison entre le déplacement.	24
Figure (II. 6) : Comparaison entre la réaction RF.	25
Figure (II. 7) : Comparaison entre les contraintes.	26
Figure (II. 8) : Résultat de calibration de la contrainte en fonction du temps.	27

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau (I.1) : Propriétés thermo-physiques (HDPE). [5]	10
Tableau (I.2) : Propriétés électriques (HDPE). [5].....	11
Tableau (I.3) : Propriétés mécaniques des polyéthylènes (HDPE). [12]	11
Tableau (I.4) : Propriétés thermiques des polyéthylènes (HDPE). [12]	11
Tableau (I.5) : Autres propriétés de HDPE. [5]	11

Chapitre II

Tableau (II. 1) : Norme ASTM 638-D. [16]	16
Tableau (II. 2) : Résultats de la simulation fournie par Abaqus.	19
Tableau (II. 3) : Changement de déplacement U en fonction de la pression appliquée P.	19
Tableau (II. 4) : Variation de la réaction RF en fonction de la pression appliquée P.	20
Tableau (II. 5) : Variation de la contrainte σ en fonction de la pression appliquée P.	20
Tableau (II. 6) : Résultats de la simulation fournie par Abaqus pour le fluage.	22
Tableau (II. 7) : Changement de déplacement U en fonction de la pression appliquée P de fluage.	23
Tableau (II. 8) : Variation de la réaction RF en fonction de la pression appliquée P du fluage.	23
Tableau (II. 9) : Variation de la contrainte σ en fonction de la pression appliquée P de fluage.	24

Nomenclature

σ_A = État de stress en A (MPa)

μ_A = Module de cisaillement initial de A (MPa)

λ_A^{look} = Limitation de l'allongement de la chaîne de A (mm)

K = Module de masse (MPa)

J_A = $\det [F]$ (N)

$\tilde{B}_A^* = J^{-2/3} \tilde{F} \tilde{F}^T$

$\bar{\lambda}_A^* = \sqrt{\text{tr}[\tilde{B}^*]}/3$

$L^{-1}(x)$ = Fonction de Langevin inverse avec $L^{-1}(x) \approx x \frac{3-x^2}{1-x^2}$

$J_{UN}^G = \det[F_{UN}^G]$ (N)

μ_{UN} = Module de cisaillement initial (MPa)

$b_{UN}^{e*} = (J_{UN}^G)^{-2/3} F_{UN}^G (F_{UN}^G)^T$ Tenseur de déformation de Cauchy-Green (mm)

$\lambda_{UN}^{e*} = (\text{tr}[b_{UN}^{e*}])/3^{1/2}$

$\dot{\varepsilon}_c$ = Contrainte de fluage (mm/s)

$\dot{\varepsilon}_0$ = Vitesse de déformation initiale (mm/s)

ε_c = Déformation de fluage (mm)

q = contrainte (MPa)

q_0 = Constante sans dimension dépend du matériau

n, m = Constantes sans dimensions dépendent du temps et température

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Les polymères naturels ont été parmi les premiers matériaux utilisés par l'Homme : bois et fibres végétales, laine, tendons d'animaux, etc. du 19^e siècle. Le terme « polymère » est utilisé pour la première fois en 1866 par Marcellin Berthelot. La vulcanisation du caoutchouc en 1844 et la production de la Bakélite en 1910, figurent parmi les premières applications industrielles. Mais il faut attendre les années 1920- 1930 pour que l'idée de macromolécule soit acceptée, notamment grâce aux travaux d'Hermann. [1]

Il existe plusieurs manières de classer les polymères selon les propriétés retenues pour les caractéristiques Staudinger.

Depuis le début des années 1950, la production des polymères est en continuelle ascension et avec une pente beaucoup plus élevée que celle des autres matériaux. Depuis le début du siècle dernier jusqu'à nos jours. Une extrapolation de cette production jusqu'à l'année 2010 y également représentée. Cette production croissante résulte d'une utilisation accrue dans le monde moderne que nous vivons. [1]

Les polymères représentent une classe de matériaux de plus en plus importante. Ils concurrencent les matériaux traditionnels, métaux et matériaux minéraux, grâce à : leur faible densité alliée à des propriétés thermomécaniques de plus en plus élaborées ; leur faible coût de production ; leurs propriétés très spécifiques leur possibilité de recyclage.[1],[2]

Ce travail se compose de trois parties :

- La première partie, est consacrée à une étude bibliographique sur les polymères ainsi que leur comportement mécanique et particulièrement le HDPE.
- Pour la deuxième partie, nous avons présenté les discussions des résultats après la modélisation numérique avec le logiciel Abaqus et Mcalibration
- Enfin, en terminera par une conclusion générale qui présente le résumé et les recommandations futures.

Chapitre I
Recherche bibliographique

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1 INTRODUCTION

A nos jours les pièces en matières plastiques peuplent notre vie quotidienne dans tous les domaines d'utilisation, elle remplace les autres matériaux.

Le polyéthylène (PE) est l'un des plastiques les plus utilisés au monde, et concerne un nombre incalculable d'industries.

Le terme qui désigne le polymère d'éthylène représente le plastique le plus courant, qui utilisé comme matière première dans plusieurs domaines d'application. Son nom vient de la polymérisation du monomère d'éthylène. Il appartenant à la famille des polyoléfines, le polyéthylène (PE) a été obtenu pour la première fois par le chimiste allemand Hans von Pechmann, en 1898 (l'expérience du chauffage du diazométhane). Puis deux chimistes anglais ont découvert par hasard la première synthèse pratique du polyéthylène en employant une molécule plus facilement accessible, l'éthylène – C_2H_4 . Les travaux autour de la polymérisation permettent l'obtention de divers types de polyéthylène dotés de différentes propriétés

Premièrement ingénieurs anglais Eric Fawcett et Reginald Gibson distingue le polyéthylène basse densité (PE-LD) après, On attribue en 1933 l'invention du PEHD aux chimistes Karl Ziegler et Giulio Natta. Depuis les prémices de cette invention, le PEHD est largement été utilisé et commercialisé, car il répond à des besoins variés. Son succès est fort : 80 millions de tonnes seraient produites chaque année sur la planète. [1]

I.2 LES POLYMERES

Définition

Polymère \Leftarrow poly (nombreux) + meros (parts)
Molécule de (très) haute masse molaire, résultant de l'enchaînement covalent d'unités structurales identiques (unités de répétition)

Avant de nous pencher sur leur processus de fabrication à proprement parler, attachons-nous à décrire plus précisément les polymères (encore récemment appelés « hauts polymères »), ces matériaux constitués de longues chaînes de molécules élémentaires assemblées (les monomères), elles-mêmes constituées d'atomes de carbone sur lesquelles des opérations chimiques permettent de fixer d'autres éléments, comme de l'hydrogène, du chlore, de l'azote, du fluor ou de l'oxygène.

Linéaires ou réticulées (appellations servant à qualifier les liaisons, simples ou nombreuses, entre les monomères) ces précieuses macromolécules sont divisées en trois grandes sections : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères. Aussi, sans établir dès maintenant une classification exhaustive des matières plastiques, attardons-nous tout de même sur les diverses caractéristiques de ces trois familles fondamentales : [2]

I.2.1 Les thermoplastiques (les polymères industriels)

Si les polymères industriels thermoplastiques, composés de chaînes linéaires, ont pour caractéristique principale, une fois chauffés au-delà d'un certain seuil de température, de présenter une certaine malléabilité facilitant leur mise en forme, ces matériaux uniques retrouvent leur rigidité initiale après refroidissement, sans pour autant que la matière soit thermiquement dégradée. Une qualité non-négligeable dont profitent directement les sociétés de recyclage du plastique, qui pourront les traiter de nouveau sans affecter leur structure moléculaire.

C'est dans cette catégorie de polymères linéaires/plastiques que l'on trouve notamment des polyamides, comme le nylon.[2]

I.2.2 Les thermodurcissables

Fondamentalement différents des thermoplastiques, ces polymères organiques réticulés se rigidifient de façon irréversible sous l'effet de la chaleur, et ne sauraient être transformés de nouveau sans impliquer une dégradation de leur structure.

En effet, la matière thermodurcissable préserve sa forme en raison des nombreuses et solides liaisons chimiques qui lient ses chaînes. Les silicones et les phénoplastes, comme la bakélite, font partie de cette famille de matériaux.[3]

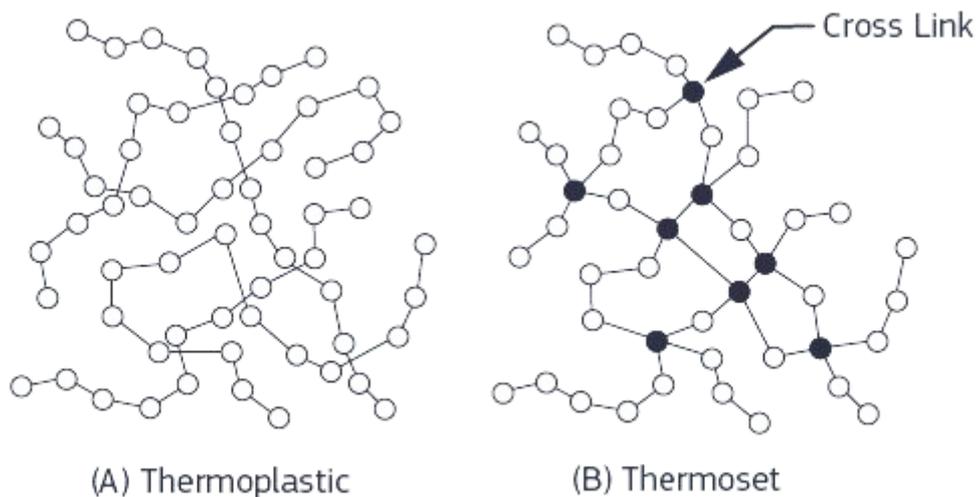


Figure (I.1) : Structure de thermoplastique et thermodurcissable. [3]

I.2.3 Les élastomères

La réticulation est une opération chimique qui consiste à former un ou plusieurs réseaux au cœur des polymères tridimensionnels, en liant entre elles les chaînes macromoléculaires.

C'est grâce à cette opération effectuée durant la conformation du polymère que les élastomères (constituant de base des caoutchoucs), particulièrement déformables, peuvent atteindre jusqu'à huit fois leur taille initiale sans approcher le point de rupture.

C'est grâce à cette opération effectuée durant la conformation du polymère que les élastomères (constituant de base des caoutchoucs), particulièrement déformables, peuvent atteindre jusqu'à huit fois leur taille initiale sans approcher le point de rupture.[4]

I.3 CLASSIFICATION DES POLYMERES

Plusieurs types de classification peuvent être attribués aux polymères. Les plus utilisées sont celles qui font appel à leurs origines ou selon l'usage qu'on en fait. Classification selon l'origine :

- **Polymères naturels** : protéines fibreuses, cheveux, laine, soie, coton, cellulose...
- **Polymères artificiels** : polymères naturels ayant subi des modifications chimiques

Exemple : la cellulose sur laquelle les fonctions OH sont remplacées par des fonctions éther ou ester

- **Polymères synthétiques** : obtenus par des réactions de polymérisation. [5]

I.4 LA POLYMERISATION

On appelle polymérisation la réaction chimique qui permet d'assembler entre eux les différents monomères par le biais de liaisons covalentes (mise en commun d'électrons des atomes constitutifs de la molécule) et transformer les bases liquides ou gazeuses des matières premières en plastomères.

Il en existe deux types principaux : la polymérisation par étapes, et la polymérisation en chaîne.[6]

I.5 LES DIFFÉRENTS TYPES DE PLASTIQUES

Il existe une multitude de types de plastiques.

Sept (7) grandes familles selon la classification établie par la Société de l'Industrie Plastique dans les années 80. Seulement voilà, si ce classement permet d'y voir plus clair dans la jungle des typologies de plastiques, il est encore peu connu en dehors de la sphère des pros du recyclage. On vous éclaire :

- Le polyéthylène téréphtalate (PET)
- Le polyéthylène haute densité (PEHD)
- Le polychlorure de vinyle (PVC)
- Le polyéthylène basse densité (LDPE)
- Le polypropylène (PP)
- Le polystyrène (PS)
- Les autres. [6]

I.6 LA FABRICATION DES POLYMÈRES ET MATIÈRES PLASTIQUES

Afin d'obtenir des matières plastiques, il est nécessaire de faire subir aux monomères récemment extraits ou fabriqués un certain nombre de transformations physiques et chimiques, qui permettront à ces substances de devenir les produits de synthèse fondamentaux de la fabrication des plastiques : les polymères.

Ces macromolécules, dont les différentes natures chimiques permettent la création de résines distinctes, voient leur propre traitement varier en fonction des matières recherchées.

Remontons ainsi jusqu'à l'origine des plastiques. [7]

I.7 IMPORTANCE ECONOMIQUE

Il n'est pas exagéré de dire qu'il rentre dans l'âge des matières plastiques". Depuis le début des années 1950, la production des polymères est en continuelle ascension et avec une pente beaucoup plus élevée que celle des autres matériaux. Cette production croissante résulte d'une utilisation accrue dans le monde moderne que nous vivons. Les domaines d'utilisation des polymères sont très divers et variés. [1]

I.8 DOMAINE D'UTILISATION DES POLYMERES

Les polymères ont rempli tous les domaines de notre vie quotidienne. Ils sont la base de plusieurs matériaux et sont utilisés dans différents domaines, tels que :

- Vêtements.
- Fibres textiles naturelles et synthétiques.
- Mousses isolantes.
- Colles.
- Vernis.
- Seaux.
- Vaisselle.
- Cannes à pêche.
- Coques de bateaux.

- Les moyens de transports et en particulier l'automobile (carrosserie, habillage intérieur, réservoirs d'essence,).
- Emballage alimentaire (bouteilles, pots de yaourt, ...) ou industriel (flacons de détergents, sachets et sacs, ...).
- Industrie électrique et électronique (boîtiers, gainage de câbles, façades de téléviseurs).
- Industrie chimique (tuyauteries, cuves, revêtements).
- Bâtiment-travaux publics (peintures, isolation, revêtement de sol, tuyauteries).
- Agriculture (arrosage, serres, bâches).
- Hygiène (verres de lunettes, lentilles de contact, prothèses, matériel hospitalier).[1]

I.9 POLYÉTHYLÈNE (HDPE)

Le HDPE (High-densité polyéthylène ou polyéthylène haute densité) appartient à la famille des polyéthylènes. Le nom HDPE fait référence à la structure moléculaire de ce thermoplastique utilisé dans une multitude d'industries, il est aussi offert en grade alimentaire, pensons par exemple au SANALITE, utilisé dans la fabrication de planches à découper. [8]



Figure (I.2) : Symbole de recyclage du plastique HDPE. [8]

I.10 UTILISATIONS DU POLYÉTHYLÈNE (HDPE)

- Utilisé dans les secteurs alimentaires,
- Médicaux.
- Chimiques.
- Les fabrications des réservoirs.
- D'équipements sportifs.
- Les prothèses.
- De produits d'emballage
- De plusieurs autres éléments. [10]

I.11 CARACTÉRISTIQUES DU POLYÉTHYLÈNE (HDPE)

Le polyéthylène HDPE est un matériau blanc ou coloré, conforme aux normes sanitaires FDA (naturel) et avec une bonne résistance aux produits chimiques.

Disponible dans un fini luisant ou autre, il se caractérise par :

- Sa rigidité.
- Sa soudabilité
- Ses propriétés thermoformables.

Cette formulation de polyéthylène est reconnue pour sa stabilité et son uniformité.[11]

Caractéristiques	Unité	Plage de valeurs
Point de fusion	°C	126 - 135
Densité	GmL -1	0,955 - 0,961
Coefficient de dilatation thermique x 10 ⁻⁵	Cm / (cm °C)	12,5 - 18,0
Température de déflexion thermique, 0,5 MPa	°C	64 - 77
Température de déformation thermique, 1,8 MPa (non recuit)	°C	76.5 - 78
Conductivité thermique	W / Mk	0,35 - 0,49
Dureté Shore, échelle D	N / A	55 - 67

Tableau (I.1) : Propriétés thermo-physiques (HDPE). [5]

Biens	Unité	Plage de valeurs
Résistivité volumique	Ohm-cm	6 - 10.15
Résistance diélectrique	V/mm x 10 ⁴	2.1 - 3.5
Constante diélectrique à 1 MHz	n / A	2.2 - 2.4
Facteur de dissipation à 1 MHz	n / A	0,0001 - 0,0005

Tableau (I.2) : Propriétés électriques (HDPE). [5]

Propriétés	HDPE
Module de Young (20°C, 100s) (GPa)	0.55–1.00
Résistance à la traction (MPa)	20-30
Ténacité (20°C) (MPa m ^{1/2})	2-5
Allongement, Rupture (%)	600 – 1350
Module de traction à 23 C (MPa)	900 – 1550
Module de flexion MPa	970- 1380

Tableau (I.3) : Propriétés mécaniques des polyéthylènes (HDPE). [12]

Propriétés	HDPE
Température de transition vitreuse Tg (°K)	300
Température de ramollissement Ts (°K)	390
Chaleur massique (J Kg ⁻¹ K ⁻¹)	2100
Conductivité thermique (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.52
Coefficient de dilatation thermique (M K ⁻¹)	150-300

Tableau (I.4) : Propriétés thermiques des polyéthylènes (HDPE). [12]

Biens	Unité	Plage de valeurs
Retrait de moule linéaire	Cm/cm	0,017
Température de service continue	°C	-73 – 82
Absorption d'eau, 24 heures. Immersion	%	0,01 - 0,03

Tableau (I.5) : Autres propriétés de HDPE. [5]

I.12 LES PRINCIPAUX AVANTAGES DU (HDPE)

Le HDPE possède certains avantages comparables à ceux de l'UHMW telles une bonne résistance chimique et une bonne résistance aux impacts. Il est aussi :

- ❖ Rigide ;
- ❖ Solidité.
- ❖ Malléable ;
- ❖ Usinable facile ;
- ❖ Résistant à l'abrasion ;
- ❖ Facile à souder.
- ❖ Résistant à la corrosion. [3], [8]

I.13 LES INCONVENIENTS (HDPE)

- Ils restent sensibles aux risques de fissuration sous très forte contrainte.
- Résiste à la température varie (exemple 105° et -50 a -250 selon les grades).[13]

I.14 LES APPLICATIONS DU (HDPE)

Puisqu'il peut être facilement moulé ou soudé selon des besoins spécifiques, le HDPE est principalement utilisé dans les secteurs alimentaires, médicaux et chimiques. Il est aussi fréquemment utilisé dans la fabrication de cuves de stockage d'eau et de bassins de stockage de produits chimiques.[8]

I.15 QUAND OPTER POUR DU (HDPE)

Pour des applications qui nécessitent une forme précise obtenue uniquement par moulage ;

- ✓ Pour des pièces de très grandes tailles qui doivent être soudées ;
- ✓ Pour des réservoirs de stockage d'eau ;
- ✓ Pour des bassins de stockage de produits chimiques ;
- ✓ Pour des planches à découper de grade alimentaire faciles à nettoyer ;
- ✓ Pour des pièces ou modules utilisés à l'extérieur.[8]

I.16 LES MODELES THEORIQUES

Il y a plusieurs modèles théoriques par exemple :

- Dans le modèle Bergström-Boyce (BB), le gradient de déformation appliqué agit sur deux réseaux macromoléculaires parallèles : $F=FA=FB$, voir la représentation rhéologique suivante :

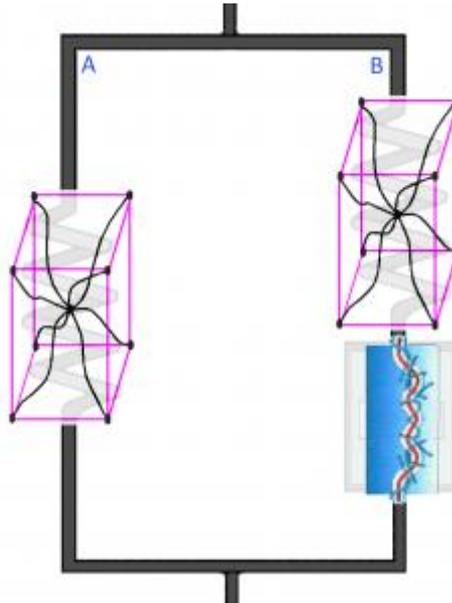


Figure (I.3) : Modèle Bergström-Boyce (BB). [9]

Le gradient de déformation agissant sur le réseau B est ensuite décomposé en composantes élastiques et viscoélastiques : $F_B = F_e B F_{vB}$. La réponse du réseau A est donnée par le modèle à huit chaînes : [9]

$$\sigma_A = \frac{\mu \zeta^{-1} (\bar{\lambda}^* / \lambda_L)}{J \lambda^* \zeta^{-1} (1 / \lambda_L)} \text{dev}[b^*] + K(J-1)I. \quad (I.1)$$

- Modèle PolyUMod Three Network (TN)

$$\sigma_{UN} = \frac{\mu_{UN}}{J_{UN}^{et} \lambda_{UN}^{e*}} \left[1 + \frac{\theta - \theta_0}{\theta} \right] \frac{\zeta^{-1} (\bar{\lambda}_{UN}^{e*} / \lambda_L)}{\zeta^{-1} (1 / \lambda_L)} \text{dev}[b_{UN}^{e*}] + K(J_{UN}^{et} - 1)j_e, \quad (I.2)$$

- Le modèle hybride (HM)
- Le modèle de réseau parallèle (PN).[9]

Chapitre II

Résultats et discussions

Chapitre II

Résultats et discussions

II.1 ESSAI DE TRACTION

II.1.1 Définition

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet d'obtenir des informations sur le comportement élastique, le comportement plastique et le degré de résistance à la rupture d'un matériau, lorsqu'il est soumis à une sollicitation unie axiale.[15]

II.1.2 Principe de traction

Consiste à appliquer à un échantillon cylindrique ou prismatique, de forme et de dimensions standardisées, un effort de traction F et à mesurer l'allongement correspondant Δl , ou bien à imposer un allongement constant Δl et à mesurer l'effort de traction F . [15]

II.1.3 La simulation utilisée

Le code éléments finis Abaqus (2018) [14] a été utilisé pour la simulation numérique de l'essai de traction pure des HDPE. Le tableau (I.3) montre les propriétés mécaniques des HDPE, voire chapitre I.

II.1.4 Normalisation d'éprouvette

Le tableau (II.1) représente la norme ASTM D-638 utilisée pour les éprouvettes de HDPE.

Norme	Type d'éprouvette	L3	L1	b2	b1	h	L0	L
ASTM D-638	I	>165	57±0.5	19+6.4	13±0.5	3.2±0.4	50±0.25	115±5
ASTM D-638	II	>183	57±0.5	19+6.4	6±0.5	3.2±0.4	50±0.25	135±5
ASTM D-638	III	>246	57±0.5	29+6.4	19±0.5	7.....14	50±0.25	115±5
ASTM D-638	IV	>115	33±0.5	19±0.5	6±0.05	3±1	25±0.13	64.5±0.5

Tableau (II. 1) : Norme ASTM 638-D. [16]

La géométrie de l'éprouvette est représenté sur la figure (II.1) selon la norme ASTM D-638 type IV.

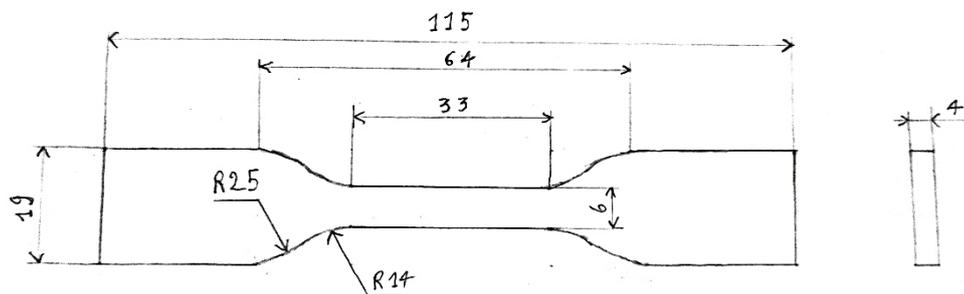


Figure (II. 1) : Géométrie d'éprouvette de HDPE

II.1.5 Les côtés éprouvette

La figure (II.2), représente les côtés d'éprouvette. Le côté (1) est encastré, par contre le côté (2) est libre et sollicité à une pression variable. Le modèle choisi du code Abaqus est linéaire élastique.

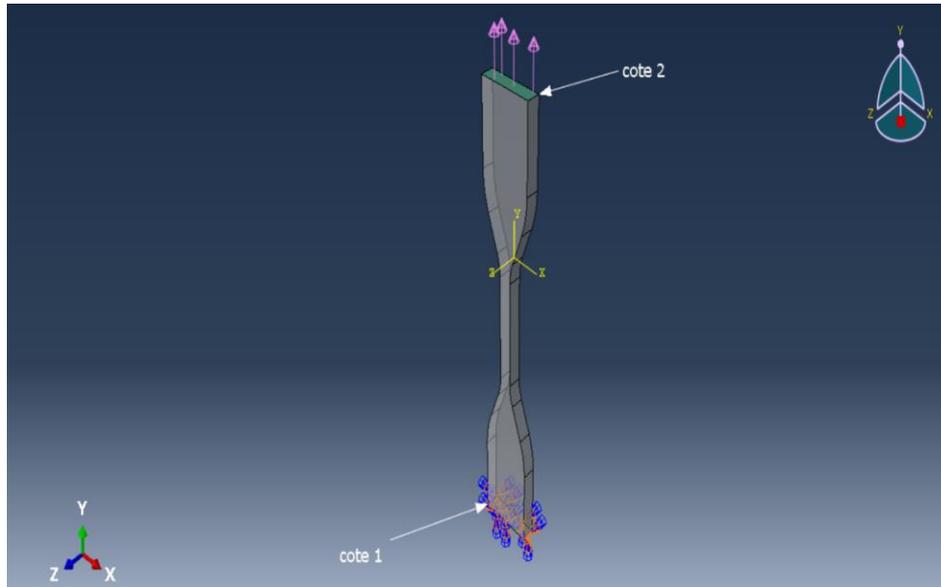


Figure (II. 2) : Les côtés d'éprouvette

II.1.6 Convergence

Pour la convergence des résultats, nous avons choisi cinq valeurs de la taille de l'élément (4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm et 0.25 mm). Nous avons constaté que la valeur de 1 mm de la taille d'élément fourni de bons résultats afin de minimiser le temps de calcul.

Le nombre d'éléments de maillage est de l'ordre de 3376, pour le nombre de nœud est 5905. Le type d'élément est le C3D8 : une brique linéaire à 8 nœuds (3D stress).

La figure (II.3) représente le maillage de l'éprouvette en traction :

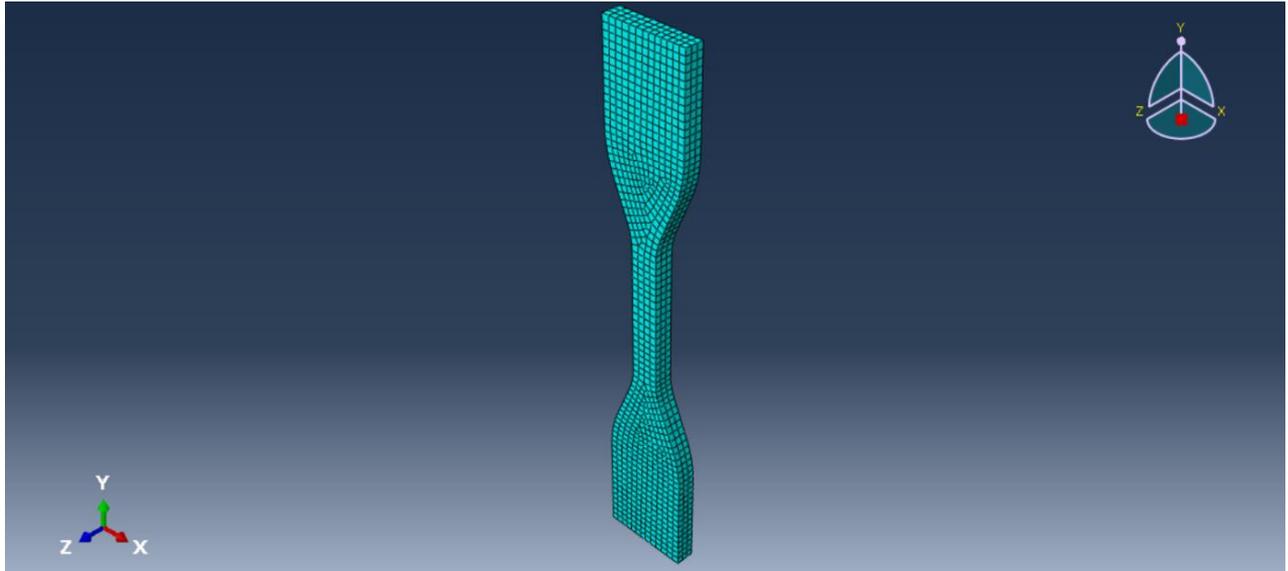


Figure (II. 3) : Maillage des éléments finis.

II.1.7 Les résultats de la simulation de l'essai de traction

Le tableau (II.2) suivant représente les résultats de déplacement U et les réactions RF et les contraintes σ pour les 5 essais.

Les essais de la simulation	1 ^{er} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai	4 ^{ème} essai	5 ^{ème} essai
Pression	2MPa	4MPa	6MPa	8MPa	10MPa
RF Réaction (N)	<p>RF, Magnitude</p> <ul style="list-style-type: none"> +7.057e+00 +6.469e+00 +5.881e+00 +5.293e+00 +4.705e+00 +4.116e+00 +3.528e+00 +2.940e+00 +2.352e+00 +1.764e+00 +1.176e+00 +5.881e-01 +0.000e+00 	<p>RF, Magnitude</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.409e+01 +1.292e+01 +1.174e+01 +1.057e+01 +9.394e+00 +8.220e+00 +7.046e+00 +5.872e+00 +4.697e+00 +3.523e+00 +2.349e+00 +1.174e+00 +0.000e+00 	<p>RF, Magnitude</p> <ul style="list-style-type: none"> +2.110e+01 +1.934e+01 +1.758e+01 +1.582e+01 +1.407e+01 +1.231e+01 +1.055e+01 +8.791e+00 +7.033e+00 +5.275e+00 +3.516e+00 +1.758e+00 +0.000e+00 	<p>RF, Magnitude</p> <ul style="list-style-type: none"> +2.825e+01 +2.589e+01 +2.354e+01 +2.118e+01 +1.883e+01 +1.648e+01 +1.412e+01 +1.177e+01 +9.415e+00 +7.062e+00 +4.708e+00 +2.354e+00 +0.000e+00 	<p>RF, Magnitude</p> <ul style="list-style-type: none"> +3.528e+01 +3.234e+01 +2.940e+01 +2.646e+01 +2.352e+01 +2.058e+01 +1.764e+01 +1.470e+01 +1.176e+01 +8.819e+00 +5.880e+00 +2.940e+00 +0.000e+00

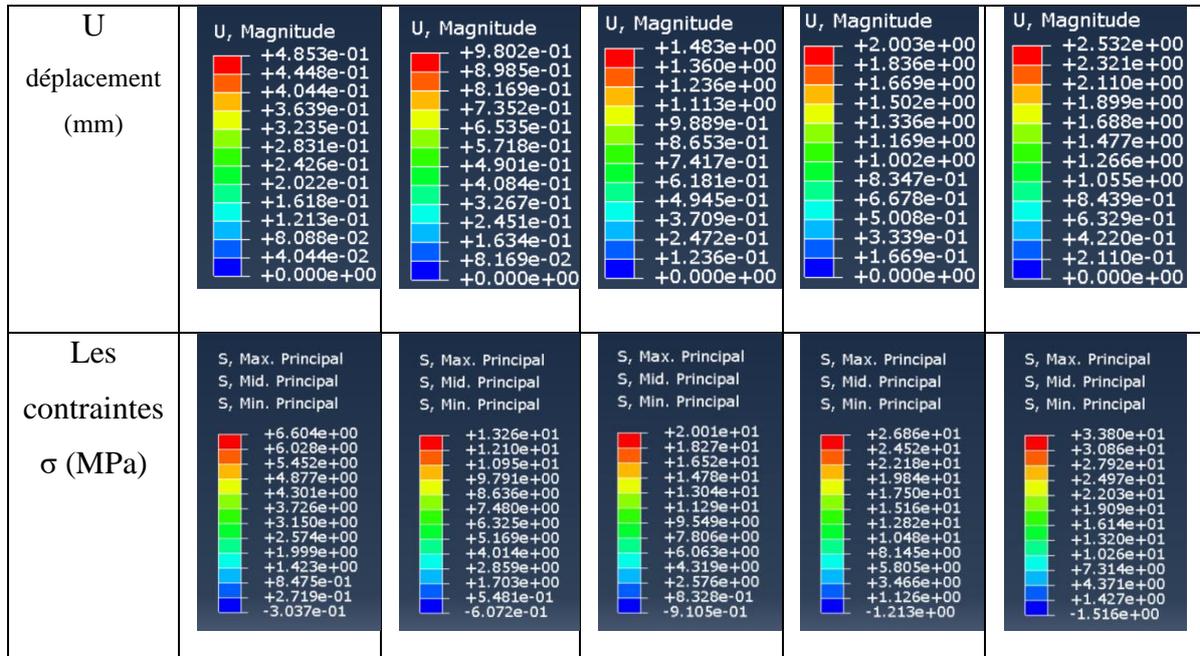


Tableau (II. 2) : Résultats de la simulation fournie par Abaqus.

Le tableau (II.3) présente les changements de déplacement maximal en matière de la pression appliquée.

U (mm)	0.48	0.98	1.48	2.00	2.53
P (MPa)	2	4	6	8	10

Tableau (II. 3) : Changement de déplacement U en fonction de la pression appliquée P.

En augmentant la pression appliquée sur le côté (2), le déplacement sur ce côté augmente linéairement pour une pression de 2 MPa jusqu'à 10 MPa. le déplacement U est de l'ordre de 0.5125 mm, voir le tableau (II.3). On constate que le déplacement varie de 0.5125 mm pour chaque intégration de pression.

Le tableau (II.4) présente les changements de la réaction maximal en matière de la pression appliquée.

RF(N)	7.057	14.09	21.10	28.25	35.28
P (MPa)	2	4	6	8	10

Tableau (II. 4) : Variation de la réaction RF en fonction de la pression appliquée P.

En augmentant la pression appliquée sur le côté (2), la réaction de force sur la côte (1) augmente linéairement pour une pression de 2 MPa jusqu'à 10 MPa. La réaction de force RF est de l'ordre 7.0575 N, voir le tableau (II.4). On constate que la réaction de force varie de 7.0575 N pour chaque intégration de pression.

Le tableau (II.5), présente les changements de la contrainte maximale en matière de la pression appliquée.

σ (MPa)	6.60	13.26	20.01	26.86	33.80
P (MPa)	2	4	6	8	10

Tableau (II. 5) : Variation de la contrainte σ en fonction de la pression appliquée P.

En augmentant la pression appliquée sur le côté (2), la contrainte augmente linéairement sur le côté (2) pour une pression de 2 MPa jusqu'à 10 MPa. La contrainte σ est de l'ordre moyenne 6.8 MPa, voir le tableau (II.5). On constate que la contrainte σ varie de 6.8425 MPa pour chaque intégration de pression.

II.2 ESSAI DE FLUAGE

II.2.1 Définition

Tout comme les essais de traction, avec le matériau a subi une déformation permanente reliée à l'écoulement irréversible. Ce phénomène concerne en particulier les fluides viscoélastiques.

II.2.2 Le modèle utilisé

Abaqus a implémenté le modèle de fluage de puissance avec l'équation suivante.[9]

$$\dot{\epsilon}_C = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{q}{q_0}\right)^{\frac{n}{m+1}} \left((m+1)\epsilon_C\right)^{m/(m+1)} \quad (\text{II.1})$$

II.2.3 Paramètres de fluage

Creep

Law: Strain-Hardening ▼ Suboptions

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

	Power Law Multiplier	Eq Stress Order	Time Order
1	2E-16	10	-0.4

OK Cancel

Figure (II. 4) : Paramètres de fluage.

II.2.4 Step (Pas)

En a utilisé un pas Viscose avec un temps de 100 s.

II.2.5 Les résultats de la simulation de l'essai de fluage

Le tableau (II.6) suivant représente les résultats de déplacement U et les réactions RF et les contraintes σ pour les 5 essais.

Les essais de la simulation	1 ^{er} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai	4 ^{ème} essai	5 ^{ème} essai
Pression	2MPa	4MPa	6MPa	8MPa	10MPa
RF Réaction (N)	RF, Magnitude +7.082e+00 +6.492e+00 +5.901e+00 +5.311e+00 +4.721e+00 +4.131e+00 +3.541e+00 +2.951e+00 +2.361e+00 +1.770e+00 +1.180e+00 +5.901e-01 +0.000e+00	RF, Magnitude +1.416e+01 +1.298e+01 +1.180e+01 +1.062e+01 +9.442e+00 +8.262e+00 +7.081e+00 +5.901e+00 +4.721e+00 +3.541e+00 +2.360e+00 +1.180e+00 +0.000e+00	RF, Magnitude +2.123e+01 +1.946e+01 +1.769e+01 +1.592e+01 +1.415e+01 +1.238e+01 +1.061e+01 +8.845e+00 +7.076e+00 +5.307e+00 +3.538e+00 +1.769e+00 +0.000e+00	RF, Magnitude +2.811e+01 +2.577e+01 +2.342e+01 +2.108e+01 +1.874e+01 +1.640e+01 +1.405e+01 +1.171e+01 +9.370e+00 +7.027e+00 +4.685e+00 +2.342e+00 +0.000e+00	RF, Magnitude +3.428e+01 +3.142e+01 +2.857e+01 +2.571e+01 +2.285e+01 +2.000e+01 +1.714e+01 +1.428e+01 +1.143e+01 +8.570e+00 +5.714e+00 +2.857e+00 +0.000e+00
U déplacement (mm)	U, Magnitude +4.827e-01 +4.425e-01 +4.022e-01 +3.620e-01 +3.218e-01 +2.816e-01 +2.413e-01 +2.011e-01 +1.609e-01 +1.207e-01 +8.045e-02 +4.022e-02 +0.000e+00	U, Magnitude +9.830e-01 +9.011e-01 +8.192e-01 +7.373e-01 +6.554e-01 +5.734e-01 +4.915e-01 +4.096e-01 +3.277e-01 +2.458e-01 +1.638e-01 +8.192e-02 +0.000e+00	U, Magnitude +2.447e+00 +2.243e+00 +2.039e+00 +1.835e+00 +1.631e+00 +1.427e+00 +1.223e+00 +1.019e+00 +8.155e-01 +6.117e-01 +4.078e-01 +2.039e-01 +0.000e+00	U, Magnitude +1.952e+01 +1.789e+01 +1.626e+01 +1.464e+01 +1.301e+01 +1.138e+01 +9.758e+00 +8.132e+00 +6.505e+00 +4.879e+00 +3.253e+00 +1.626e+00 +0.000e+00	U, Magnitude +1.672e+02 +1.532e+02 +1.393e+02 +1.254e+02 +1.114e+02 +9.751e+01 +8.358e+01 +6.965e+01 +5.572e+01 +4.179e+01 +2.786e+01 +1.393e+01 +0.000e+00
Les contraintes σ (MPa)	S, Max. Principal S, Mid. Principal S, Min. Principal +6.596e+00 +6.021e+00 +5.446e+00 +4.871e+00 +4.296e+00 +3.721e+00 +3.146e+00 +2.571e+00 +1.996e+00 +1.421e+00 +8.459e-01 +2.709e-01 -3.041e-01	S, Max. Principal S, Mid. Principal S, Min. Principal +1.309e+01 +1.195e+01 +1.081e+01 +9.666e+00 +8.524e+00 +7.383e+00 +6.241e+00 +5.099e+00 +3.958e+00 +2.816e+00 +1.675e+00 +5.333e-01 -6.082e-01	S, Max. Principal S, Mid. Principal S, Min. Principal +1.927e+01 +1.758e+01 +1.590e+01 +1.422e+01 +1.254e+01 +1.086e+01 +9.177e+00 +7.495e+00 +5.814e+00 +4.132e+00 +2.451e+00 +7.693e-01 -9.123e-01	S, Max. Principal S, Mid. Principal S, Min. Principal +2.577e+01 +2.340e+01 +2.104e+01 +1.867e+01 +1.631e+01 +1.395e+01 +1.158e+01 +9.220e+00 +6.856e+00 +4.493e+00 +2.129e+00 -2.343e-01 -2.598e+00	S, Max. Principal S, Mid. Principal S, Min. Principal +3.221e+01 +2.920e+01 +2.619e+01 +2.318e+01 +2.017e+01 +1.716e+01 +1.415e+01 +8.134e+00 +5.124e+00 +2.114e+00 -8.952e-01 -3.905e+00

Tableau (II. 6) : Résultats de la simulation fournie par Abaqus pour le fluage.

Le tableau (II.7) présente les changements de déplacement maximal en termes de la pression appliquée.

U (mm)	0.48	0.98	2.45	19.52	167.2
P (MPa)	2	4	6	8	10

Tableau (II. 7) : Changement de déplacement U en fonction de la pression appliquée P de fluage.

En augmentant la pression appliquée sur le côté (2), le déplacement sur ce côté augmente pour une pression de 2 MPa jusqu'à 10 Mpa, voir le tableau (II.7). On constate que le déplacement varie de 0.48 mm jusqu'à 167.2 mm.

Le tableau (II.8) présente les changements de la réaction maximale en termes de la pression appliquée.

RF(N)	7.08	14.16	21.23	28.11	34.28
P (MPa)	2	4	6	8	10

Tableau (II. 8) : Variation de la réaction RF en fonction de la pression appliquée P du fluage.

En augmentant la pression appliquée sur le côté (2), la réaction de force sur la côte (1) augmente linéairement pour une pression de 2 MPa jusqu'à 10 MPa. voir le tableau (II.8).

Le tableau (II.9), présente les changements de la contrainte maximale en termes de la pression appliquée.

σ (MPa)	6.596	13.09	19.27	25.77	32.21
P (MPa)	2	4	6	8	10

Tableau (II. 9) : Variation de la contrainte σ en fonction de la pression appliquée P de fluage.

II.3 La comparaison des résultats de la traction et de fluage

II.3.1 Le déplacement

D'après la figure (II.5), on remarque que le déplacement entre traction pure et au fluage est au même niveau pour la pression de 2 MPa et de 4 MPa. Mais en fluage celui-là est plus grand que de la traction sur la pression de 6 MPa. Alors on constate que ce déplacement est énormément très grand par incrémentation de la pression.

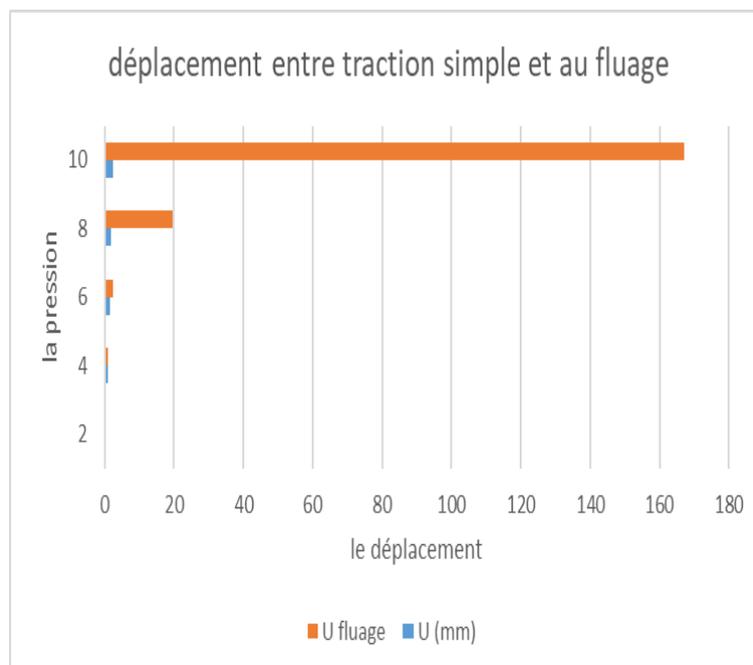


Figure (II. 5) : Comparaison entre le déplacement.

II.3.2 La réaction RF

D'après la figure (II.6), on voit que la réaction et presque la même au niveau de la pression 2, 4, 6 et 8 MPa, mais à 10 MPa ; on note que la réaction de traction est un peu plus importante que le fluage.

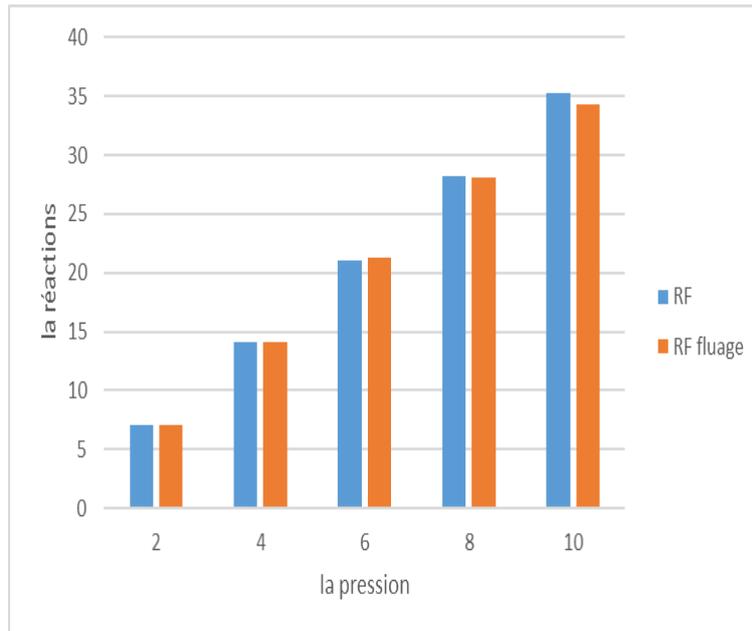


Figure (II. 6) : Comparaison entre la réaction RF.

II.3.3 Les contraintes

D'après la figure (II.7), on voit que les contraintes maximales de traction sont plus importantes que le fluage, mais avec une petite variation.

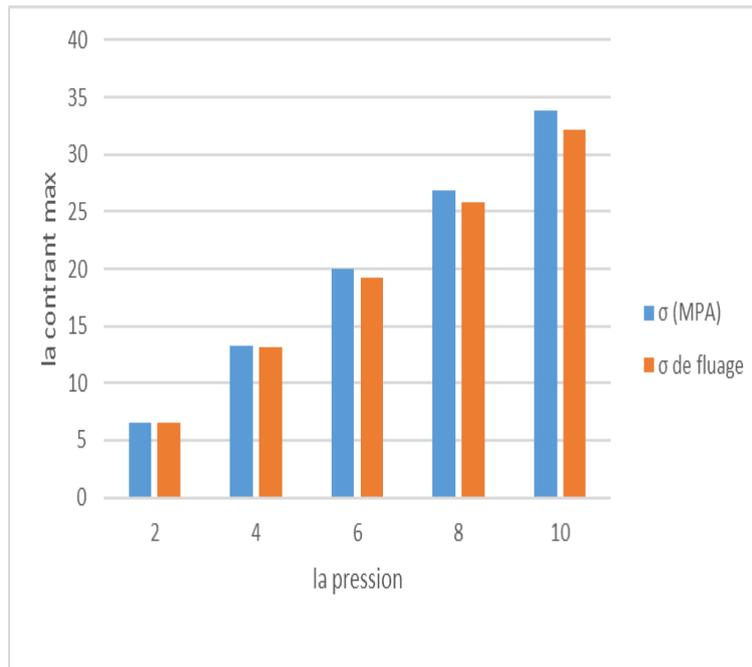


Figure (II. 7) : Comparaison entre les contraintes.

D'après c'est comparaison, en déduit que le polyéthylène de haute densité résiste à la traction mieux que fluage.

II.4 CALIBRATION

Pour la calibration nous avons utilisé le code MCalibration pour calibrer les modèles de matériaux.

Le code Mcalibration (5.0.0) permet de la calibration des résultats numériques et expérimentaux selon le modèle choisi pour le matériau. Pour la calibration des résultats numériques. le modèle de MCalibration 3DNT.

On a utilisé la calibration pour le résultat de 1^{er} essai de traction pure, en a trouvé le résultat suivant dans la figure (II.8).

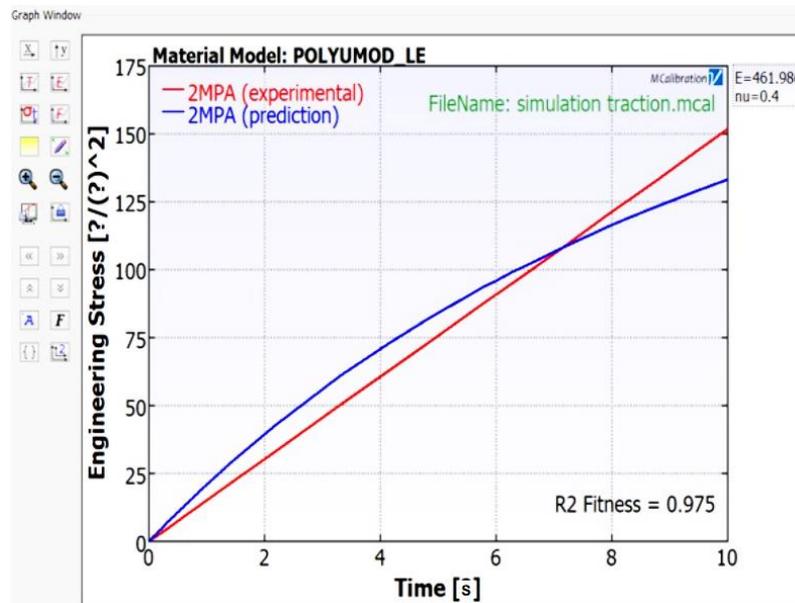


Figure (II. 8) : Résultat de calibration de la contrainte en fonction du temps.

Après calibration des résultats numériques fournis par le code Abaqus, on constate que le modèle linéaire élastique est adéquat avec le modèle fourni par MCalibration ; avec un module d'Young égal à 461.986 MPa et coefficient de poisson de 0.4

II.5 CONCLUSION

Les résultats du test de traction pure sont obtenus pour les cinq valeurs de pressions, contraintes et réactions ainsi que les déformations augmentent de façon linéaire.

Pour l'essai de fluage, nous avons pris les mêmes paramètres pour l'incrément de la pression, les contraintes et les réactions varient linéairement, mais elles sont inférieures à celles de la traction pure, par contre les déformations augmentent paraboliquement.

Après calibration des résultats numériques fournis par le code Abaqus, on constate que le modèle linéaire élastique est adéquat avec le modèle fourni par MCalibration.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Tout le long du mémoire de fin d'études, deux codes ont été utilisés ; il s'agit du code de modélisation numérique par éléments finis (Abaqus) et le code de calibration (Mcalibration). Le matériau étudié est un polymère de haute densité le HDPE employé dans le transport du gaz naturel.

Les échantillons du HDPE sont de format plat soumis à des contraintes de traction pure selon une direction à une pression variable (2, 4, 6, 8 et 10 MPa). Les contraintes et les déformations ont été alors obtenues par le code Abaqus. En second lieu les mêmes échantillons sont sollicités aux contraintes de fluage. On remarque que les déplacements et les déformations augmentent en fonction de l'incrément de la pression appliquée sur le côté supérieur, cette augmentation est linéaire.

Pour l'essai de fluage nous avons pris le même protocole que précédemment avec les mêmes incréments de la pression. Les contraintes et les réactions augmentent linéairement, mais elles sont inférieures à celles obtenues par l'essai de traction. Les déformations augmentent paraboliquement.

Pour la calibration des résultats obtenus précédemment, on a utilisé le code Mcalibration. Ce dernier dispose d'une librairie de modèle spécialement conçu pour les polymères. Il permet la calibration des résultats numériques et expérimentaux selon le modèle choisi pour le matériau. Dans notre cas, nous avons opté pour un modèle linéaire élastique. Après calibration des résultats numériques fournis par le code Abaqus, on constate que le modèle linéaire élastique est adéquat avec le modèle fourni par Mcalibration ; avec un module d'Young égal à 461,986 MPa et un coefficient de poisson de 0,4.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Elias, H. G. 1993. *An Introduction to Plastics*, Weinheim: VCH
- [2] Charrier, J. A. 1990. *Polymeric Materials and Processing*, Munich: Hanser
- [3] BAILLEUL, J. L., GUYONVARCH, G., GARNIER, B., *et al.* Identification des propriétés thermiques de composites fibres de verre/résines thermodurcissables : Application à l'optimisation des procédés de moulage. *Revue Générale de Thermique*, 1996, vol. 35, no 409, p. 65-76.
- [4] MAITI, Madhuchhanda, BHATTACHARYA, Mithun, et BHOWMICK, Anil K. Elastomer nano composites. *Rubber Chemistry and Technology*, 2008, vol. 81, no 3, p. 384-469.
- [5] CHAI, F., RAOUL, G., WISS, A., *et al.* Les biomatériaux de substitution osseuse: classification et intérêt. *Revue de Stomatologie et de Chirurgie Maxillo-faciale*, 2011, vol. 112, no 4, p. 212-221.
- [6] CHAMPETIER, Georges et SEKIGUCHI, Hikaru. Mécanisme réactionnel de la polymérisation anionique des lactames. *Journal of Polymer Science*, 1960, vol. 48, no 150, p. 309-319.
- [7] MICHEL, J. Histoire industrielle des polymères. *Actualité Chimique*, 2006, vol. 300, p. 7.
- [08] SANGAM, Henri P. et ROWE, R. Kerry. Effects of exposure conditions on the depletion of antioxidants from high-density polyethylene (HDPE) geomembranes. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, vol. 39, no 6, p. 1221-1230.
- [09] <https://polymerfem.com/polyumod/> 06/06/2022 à 11:25
- [10] ARUTCHELVI, J., SUDHAKAR, M., ARKATKAR, Ambika, *et al.* Biodegradation of polyethylene and polypropylene. 2008.
- [11] BOUAFIF, Hassine. *Effets des caractéristiques intrinsèques des fibres de bois et des procédés de mise en forme sur la performance des matériaux composites bois/thermoplastique*. 2009. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue ; Université du Québec à Montréal.
- [12] J. Bost, *Matières plastiques II, Technologie-plasturgie, Technique et documentation*, Paris, 1982
- [13] SCHOUWENAARS, R., JACOBO, V. H., RAMOS, E., *et al.* Slow crack growth and failure induced by manufacturing defects in HDPE-tubes. *Engineering Failure Analysis*, 2007, vol. 14, no 6, p. 1124-1134.
- [14] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/latest-release/>

21/04/2022 a 25:35

[15] ADDIEGO, Frédéric. *Caractérisation de la variation volumique du polyéthylène au cours de la déformation plastique en traction et en fluage*. 2006. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.

[16] Norme ASTM D 638-72, Standard Method of test for ; tensileproperties of plastics.

[17] <https://www.veryst.com/software> 27/04/2022 a 4:45