

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

Caractérisation expérimentale et numérique du comportement viscoélastique d'une famille de membranes thermoplastiques ABS (Acrylonitrile butadiène styrène), HIPS (High Impact Polystyrène), PP (Polypropylène) et PVC (chlorure de polyvinyle) sous l'effet combiné de la température et de la gravité

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

MOHAMMED SLAOUI HASNAOUI

DIRECTEUR DE RECHERCHE : FOUAD ERCHIQUI, PhD.

NOVEMBRE 2023



BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

CE MÉMOIRE A ÉTÉ RÉALISÉ
À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN
ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
DANS LE CADRE DU PROGRAMME DE
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

Maîtrise (2023)
Témiscamingue
(Ingénierie mécanique).
Québec

Université du Québec en Abitibi-

Rouyn-Noranda,

TITRE : Caractérisation expérimentale et numérique du comportement viscoélastique d'une famille de membranes thermoplastiques ABS (Acrylonitrile butadiène styrène), HIPS (High Impact Polystyrène), PP (Polypropylène) et PVC (chlorure de polyvinyle) sous l'effet combiné de la température et de la gravité

AUTEUR : Mohammed SLAOUI HASNAOUI (génie mécanique, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue)

DIRECTEUR : Professeur Erchiqui Fouad, Ph. D.

NOMBRE DE PAGES : 126

REMERCIEMENT

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, le professeur-chercheur *Fouad Erchiqui* de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, pour sa confiance, son soutien et ses encouragements tout au long de ce mémoire. Il a créé les conditions idéales pour la réalisation de ce projet de recherche et je lui suis infiniment reconnaissant pour sa confiance indéfectible en moi.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté de juger mon travail. Leur participation et leur évaluation ont été d'une grande valeur pour moi, et je leur exprime ma profonde reconnaissance.

Je ne peux oublier de remercier l'ensemble du personnel de l'UQAT, qui contribue chaque jour à améliorer notre environnement de vie et nous permet de progresser dans un cadre sain et convivial.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude envers mes proches pour leur amour inconditionnel et leur confiance indéfectible. Leur soutien m'a aidé à surmonter de nombreux obstacles. Je pense particulièrement à mes parents qui m'ont donné la force de mener ce parcours jusqu'au bout. Des mots ne suffiront jamais à exprimer ma gratitude envers eux. J'adresse également toute mon affection à ma sœur pour son soutien constant. Je suis également reconnaissant envers mes amis qui sont devenus une seconde famille et ont rendu mon séjour à Rouyn véritablement agréable.

Je remercie tous ceux qui, par leurs remarques constructives, m'ont permis d'améliorer la qualité de mon travail. Je rends hommage à tous ceux qui, à leur manière, m'ont aidé à mener cette thèse à bien.

À tous ceux qui ont cru en moi, je vous suis profondément reconnaissant. Votre soutien et votre confiance ont été des éléments essentiels de ma réussite.

RÉSUMÉ

La simulation numérique de l'étape de chauffage des thermoplastiques en thermoformage nécessite une bonne connaissance du comportement des matériaux utilisés. Toutefois, la caractérisation viscoélastique sous l'effet combiné de la gravité et la température des membranes thermoplastique ne semble pas être élucidé en littérature scientifique. C'est dans ce cadre que le travail s'inscrit et il concerne une étude expérimentale et numérique sur le comportement viscoélastique d'une famille de thermoplastique (ABS : Acrylonitrile butadiène styrène, HIPS : High Impact Polystyrène, PP : Polypropylène et PVC : chlorure de polyvinyle) sous l'effet combiné de la température et de la force de gravité.

Les tests expérimentaux ont été réalisés dans un four à convection pour cinq températures (100, 110, 120, 130 et 140°C). Pour la caractérisation numérique du comportement des membranes, le modèle viscoélastiques de Burger modifié à trois paramètres (modèle de Jeffrey) a été utilisé. Les paramètres mécaniques ont été identifiés à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Finalement, la dépendance thermique de la viscosité a été caractérisée par le modèles thermique de l'équation de William-Landel-Ferry.

Mots-Clés : Caractérisation expérimentale, comportement viscoélastique, membrane thermoplastique, ABS (Acrylonitrile butadiène styrène), HIPS (High Impact Polystyrène), PP (Polypropylène) et PVC (chlorure de polyvinyle), modélisation numérique.

ABSTRACT

The numerical simulation of the heating stage in thermoplastics during thermoforming requires a thorough understanding of the behavior of the materials used. However, the viscoelastic characterization under the combined effects of gravity and temperature in thermoplastic membranes does not appear to be fully elucidated in scientific publications. It is within this context that this work is situated, focusing on an experimental and numerical study of the viscoelastic behavior of a family of thermoplastics (ABS: Acrylonitrile Butadiene Styrene, HIPS: High Impact Polystyrene, PP: Polypropylene, and PVC: Polyvinyl Chloride) under the combined influence of temperature and gravity. Experimental tests were conducted in a convection oven at five temperatures (100, 110, 120, 130, and 140°C). For the numerical characterization of membrane behavior, the modified three-parameter Burger viscoelastic model (Jeffrey model) was employed. Mechanical parameters were identified using the Levenberg-Marquardt algorithm. The thermal dependence of viscosity was characterized by thermal model: the William-Landel-Ferry equation.

Keywords: experimental characterization, viscoelastic behavior, thermoplastic membrane, ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), HIPS (High Impact Polystyrene), PP (Polypropylene), and PVC (Polyvinyl Chloride), numerical modeling.

Table des matières

REMERCIEMENT	i
RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT.....	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux.....	x
Liste des symboles.....	xi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION AUX MATÉRIAUX PLASTIQUES.	3
1. Introduction.....	3
2. Contexte générale.....	3
2.1. Les matériaux plastiques.....	4
2.1.1. Acrylonitrile butadiène styrène (ABS).....	6
2.1.2. Polystyrène à haut impact (HIPS).....	8
2.1.3. Polypropylène (PP).....	9
2.1.4. Chlorure de polyvinyle (PVC).....	10
2.2. Technique de mise en forme.....	11
2.2.1. Injection, extrusion-soufflage et thermoformage.....	12
2.2.1.1. Injection.....	12
2.2.1.2. Extrusion-soufflage.....	13
2.2.2. Thermoformage.....	15
3. Méthodes de caractérisation comportementales des thermoplastiques	17
3.1. Méthode expérimentale.....	18
3.2. Méthodes de modélisation numérique en mécanique	21
3.3. Méthode d'identification	22
4. Problématique	28
4.1. Problématique	28
4.2. Objectifs.....	29
4.2.1. Objectif générale.....	29
4.2.2. Objectifs spécifiques.....	29
4.3. Hypothèses.....	29
CHAPITRE 2 : MODELES DE COMPORTEMENT DES POLYMERES THERMOPLASTIQUES.....	30

1.	Généralités	30
2.	Modèle de comportement élastique	31
3.	Modèle de comportement viscoélastique	32
3.1	Le modèle de Maxwell.....	33
3.2	Le modèle Kelvin-Voigt	36
3.3	Le modèle Burger	39
4.	Modèle de comportement hyper-élastique	40
4.1	Le modèle de Money-Rivlin	41
4.2	Le modèle de Ogden	42
5.	Modèle thermomécanique relative à la viscosité	43
5.1.	Loi de William, Landel et Ferry (WLF).....	43
CHAPITRE 3 : MODÉLISATION EXPERIMENTALES ET NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT VISCOÉLASTIQUE DES MEMBRANES SOUS L'EFFET DE LA GRAVITÉ ET DE LA TEMPÉRATURE.		44
1.	Introduction.....	44
1.1.	Méthodologie	45
1.2.	Matériaux	45
1.3.	Système d'acquisition de données	52
1.4.	Déroulement expérimental.....	53
2.	Montage expérimental.....	54
2.1.	Chambre environnementale	54
2.2	Module de fixation de la membrane	55
2.3.	Capteurs de mesure de la température	56
2.4	Capteur de position (Laser).....	57
2.5	Système d'acquisition des données.....	59
3	Résultats expérimentaux	60
3.1	Introduction.....	60
3.2	Manipulation et déroulement	60
4	Résultats expérimentaux	62
4.1	Comportement de l'ABS sous l'action de la température et la gravité	62
4.2	Comportement de l'HIPS sous l'action de la température et la gravité	64
4.3.	Comportement de PP sous l'action de la température et la gravité	66
4.4.	Comportement de PVC sous l'action de la température et la gravité.....	68

5. Discussion des résultats expérimentaux d'affaissements des membranes.....	70
CHAPITRE 4 : IDENTIFICATION VISCOÉLASTIQUE	72
1. Introduction.....	72
1.1 Modèle modifié de Burgers à trois paramètres pour l'ABS.....	74
1.2 Modèle modifié de Burgers à trois paramètres pour le HIPS	80
1.3 Modèle modifié de Burgers à trois paramètres pour le PP.....	86
1.4 Modèle modifié de Burgers à trois paramètres pour le PVC	92
2. Identification des lois thermiques relatives à la viscosité	98
2.1. Loi WLF pour l'ABS	99
2.2 Loi WLF pour le HIPS	101
2.3 Loi WLF pour le PP	102
2.4 Loi WLF pour le PVC.....	104
CONCLUSION.....	107
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	108

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Configuration des chaînes de polymères thermodurcissable (Ouellette, 2018).....	5
Figure 2 : Configuration des chaînes de polymères thermoplastique (Ouellette, 2018)	5
Figure 3 : Configuration des chaînes des Elastomères (Ouellette, 2018)	6
Figure 4 : représentation chimique de la molécule d'acrylonitrile	7
Figure 5 : représentation chimique de la molécule du butadienne	7
Figure 6 : représentation chimique de la molécule du styrene.....	7
Figure 7 : représentation chimique de la molécule du butadienne	8
Figure 8 : représentation chimique de la molécule du styrene.....	9
Figure 9 : représentation chimique du polypropylène	9
Figure 10 : représentation chimique du Chlorure de vinyle	10
Figure 11 : Structure des liaisons dans les chaines de polymère (Ouellette, 2018)	11
Figure 12 : Technique de moulage par injection (Gosselin, 2005)	13
Figure 13 : Schéma de principe d'une extrudeuse (Kaoussi, 2013).....	14
Figure 14 : Technique de moulage par extrusion-soufflage (Verron, 1997)	15
Figure 15 : Technique de thermoformage sous pression (Bioud, 2020)	16
Figure 16 : Technique de thermoformage à l'aide de deux moules (Bioud, 2020)	17
Figure 17 : Technique de caractérisation par soufflage biaxial	19
Figure 18 : Technique de caractérisation par extension equibiaxiale.....	20
Figure 19 : Application de la methode des moindres carrés (Cortial, 1990).....	23
Figure 20 : Architecture d'un réseau de neurones	26
Figure 21 : Modele décrivant le comportement de matériaux elastiques (Zhi-Qiang, 2005)..	30
Figure 22 : Modele décrivant le comportement de matériaux visqueux (Zhi-Qiang, 2005) ...	31
Figure 23 : Modele décrivant le comportement de matériaux plastique (Zhi-Qiang, 2005)...	31
Figure 24 : Comportement élastoplastique (Ouellette, 2018).....	32
Figure 25 : Représentation schématique du modèle de Maxwell (Ben Aoun,2019).....	33
Figure 26 : Essai de fluage représenté par le modèle de Maxwell (Liang,2016)	35
Figure 27 : Essai de fluage représenté par le modèle de Maxwell (Liang, 2016)	35
Figure 28 : Essai de relaxation représenté par le modèle de Maxwell (Liang,2016).....	35
Figure 29 : Essai de relaxation représenté par le modèle de Maxwell (Liang, 2016).....	36
Figure 30 : Représentation schématique du modèle de Kelvin-Voigt (Ben Aoun, 2019)	37
Figure 31 : Essai de fluage représenté par le modèle de Kelvin-Voigt (Liang, 2016)	38
Figure 32 : Essai de fluage représenté par le modèle de Kelvin-Voigt (Liang, 2016)	38
Figure 33 : Modèle de Burgers (Ben Aoun, 2019)	39
Figure 34 : Test de relaxation représenté par un modèle de Burgers (Liang, 2016)	40
Ainsi la variation de la contrainte est exprimé de la manière suivante (Liang, 2016) :	40
Figure 35 : membrane circulaire découpée (HIPS).....	46
Figure 36 : membrane circulaire découpée (ABS)	48
Figure 37 : membrane circulaire découpée (PP)	50
Figure 38 : membrane circulaire découpée (PVC).....	52
Figure 40 : Four à conviction (chambre environnementale).....	54
Figure 41 : dispositif de fixation pour membranes circulaire découpée	55
Figure 42 : Dimensionnement des deux anneaux pour fixer la membrane.....	56

Figure 43 : Capteur de mesure de la température de la membrane	57
Figure 44 : Capteur de mesure de la position de la membrane.....	58
Figure 45 : Planche de circuit imprimé	60
Figure 46 : démarche à suivre pour l'expérimentation.....	61
Figure 47 : Affaissement de la membrane (ABS) pour des températures différentes.	63
Figure 48 : Variation de la hauteur maximale de la membrane (ABS) avec la température .	64
Figure 49 : Affaissement de la membrane (HIPS) pour des températures différentes.	65
Figure 50 : Affaissement maximale de la membrane (HIPS) avec la température.....	66
Figure 51 : Affaissement de la membrane (PP) pour des températures différentes.	67
Figure 52 : Affaissement maximale de la membrane (PP) avec la température	68
Figure 53 : Affaissement de la membrane (PVC) pour des températures différentes.....	69
Figure 54 : Affaissement maximale de la membrane (PVC) avec la température.....	70
Figure 55 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température T100°C	75
Figure 56 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température T = 110°C ..	75
Figure 57 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température T = 120°C ..	76
Figure 58 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température T = 130°C ..	76
Figure 59 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température T = 140°C ..	77
Figure 59 : Variation de la viscosité de l'ABS en fonction de la température (modèle de Burger modifié)	79
Figure 60 : Variation du module de rigidité de l'ABS en fonction de la température (modèle de Burger modifié).....	79
Figure 61 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 100°C ..	80
Figure 62 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 110°C ..	81
Figure 63 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 120°C ..	81
Figure 64 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 130°C ..	82
Figure 65 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 130°C ..	82
Figure 65 : Variation de la viscosité de l'HIPS en fonction de la température (modèle de Burger modifié)	85
Figure 66 : Variation du module de rigidité de l'HIPS en fonction de la température (modèle de Burger modifié).....	85
Figure 67 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 100°C.....	86
Figure 68 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 110°C.....	87
Figure 69 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 120°C.....	87
Figure 70 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 130°	88
Figure 71 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 140°	88
Figure 72 : Variation de la viscosité de l'PP en fonction de la température (modèle de Burger modifié).....	91
Figure 73 : Variation du module de rigidité de l'PP en fonction de la température (modèle de Burger modifié)	92
Figure 74 : Déformation du PVC en fonction du temps pour une température T = 100°C....	93
Figure 75 : Déformation du PVC en fonction du temps pour une température T = 110°C....	93
Figure 76 : Déformation du PVC en fonction du temps pour une température T = 120°C....	94
Figure 77 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 130°C.....	94
Figure 78 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 140°C.....	95
Figure 79 : Variation de la viscosité du PVC en fonction de la température (modèle de Burger modifié)	97

Figure 80 : Variation du module de rigidité du PVC en fonction de la température (modèle de Burger modifié).....	98
Figure 81 : Évolution de la viscosité de l'ABS en fonction de la température pour les deux modèles (trois paramètres visqueux, WLF)	100
Figure 82 : Évolution de la viscosité du HIPS en fonction de la température pour les deux modèles (trois paramètres visqueux, WLF)	102
Figure 83 : Évolution de la viscosité du PP en fonction de la température pour les deux modèles (trois paramètres visqueux, WLF)	104
Figure 84 : Évolution de la viscosité du PVC en fonction de la température pour les deux modèles (trois paramètres visqueux, WLF)	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Spécifications de différents algorithmes (Ben Aoun et al., 2020a)	25
Tableau 2 dimension de la membrane HIPS.....	46
Tableau 3 dimension de la membrane ABS	48
Tableau 4 dimension de la membrane PP	50
Tableau 5 dimension de la membrane PVC.....	52
Tableau 6 dimension de la chambre environnementale.....	54
Tableau 7 Paramètre de calcul de contrainte pour chaque matériau.....	74
Tableau 8 Évolution de la rigidité et de la viscosité de l'ABS en fonction de la température, comme décrite par le modèle à trois paramètres visqueux	78
Tableau 9 Valeurs numériques de E et η obtenus par modélisation pour l'ABS	78
Tableau 10 Évolution de la rigidité et de la viscosité de l'HIPS en fonction de la température, comme décrite par le modèle à trois paramètres visqueux	83
Tableau 11 Valeurs numériques de E et η obtenus par modélisation pour l'HIPS.....	84
Tableau 12 Évolution de la rigidité et de la viscosité de l'PP en fonction de la température, comme décrite par le modèle à trois paramètres	90
Tableau 13 Valeurs numériques de E et η obtenus par modélisation pour le PP.....	90
Tableau 14 Évolution de la rigidité et de la viscosité du PVC en fonction de la température, comme décrite par le modèle à trois paramètres	96
Tableau 15 Valeurs numériques de E et η obtenus par modélisation pour le PVC	96
Tableau 16 Comparaison entre les valeurs de la viscosité déterminées par la simulation et celles calculées par l'équation WLF	99
Tableau 17 Comparaison entre les valeurs de la viscosité déterminées par la simulation et celles calculées par l'équation WLF	101
Tableau 18 Comparaison entre les valeurs de la viscosité déterminées par la simulation et celles calculées par l'équation WLF	103
Tableau 19 Comparaison entre les valeurs de la viscosité déterminées par la simulation et celles calculées par l'équation WLF	105

LISTE DES SYMBOLES

<i>Symbole</i>	<i>Grandeur</i>	<i>Unité</i>
T_{kv}	<i>Temps de relaxation du modèle Kelvin-Voigt</i>	<i>S</i>
$\dot{\epsilon}$	<i>Vitesse de déformation</i>	-
C	<i>Tenseur de déformation de Cauchy</i>	-
D	<i>Diamètre</i>	<i>mm</i>
E	<i>Module d'élasticité</i>	<i>GPa</i>
e	<i>Épaisseur</i>	<i>mm</i>
M	<i>Masse</i>	<i>Kg</i>
T	<i>Température</i>	<i>°C ou K</i>
V	<i>Vitesse de translation</i>	<i>m.s-1</i>
W	<i>Énergie de déformation</i>	<i>J</i>
Z	<i>Hauteur verticale au pôle de la membrane</i>	<i>mm</i>
a_r	<i>Facteur de glissement</i>	-
E_a	<i>Énergie d'activation</i>	<i>J.mol-1</i>
Re	<i>Limite d'élasticité</i>	<i>Pa</i>
T_f	<i>Température de fusion</i>	<i>°C ou K</i>
T_g	<i>Température de transition vitreuse</i>	<i>°C ou K</i>
H	<i>Viscosité</i>	<i>Pa.s</i>
M	<i>Viscosité dynamique</i>	<i>Pa.s</i>
P	<i>Masse volumique</i>	<i>kg.m-3</i>
Σ	<i>Contrainte</i>	<i>Pa</i>
E	<i>Déformation</i>	-
η_0	<i>Viscosité de référence</i>	<i>Pa.s</i>
E_e	<i>Déformation élastique</i>	-
E_v	<i>Déformation anélastique</i>	-
E_{vp}	<i>Déformation viscoplastique</i>	-

INTRODUCTION

Au fil des décennies récentes, un intérêt croissant s'est manifesté à l'égard des matériaux thermoplastiques en raison de leurs avantages comparatifs avec des matériaux conventionnels tels que le verre, l'acier, le bois et le béton (Mouloudi, 2009). Ces produits synthétiques, qui se distinguent par leur abordabilité, leur recyclabilité et leurs propriétés ajustables, répondent largement aux exigences énoncées (Besson, 2013). Néanmoins, la maîtrise de la mise en forme de ces matériaux à travers divers procédés industriels tels que l'injection, l'extrusion, le thermoformage et le soufflage s'avère complexe en raison de la difficulté à anticiper leur comportement (Laroche & Erchiqui, 1999).

En réalité, une connaissance approfondie du comportement thermomécanique des thermoplastiques s'avère indispensable avant d'entamer le processus de mise en forme (Erchiqui, Imad, Mouloudi, & Hsnaoui, 2010). Ce comportement est tributaire de divers facteurs primaires tels que la température, le temps, les contraintes appliquées sur le matériau, le procédé de transformation utilisé, ainsi que l'historique des déformations subies par le matériau.

L'identification des paramètres mécaniques des thermoplastiques présentant un comportement complexe qui nécessite une approche hybride combinant modélisation numérique, résultats expérimentaux et méthodes d'identification robustes telles que la méthode des moindres carrés, les réseaux de neurones, etc. (Derdouri et al., 2000 ; Erchiqui, 2005 ; Verron, Khayat, Derdouri, & Peseux, 1999). En adoptant cette approche, notre objectif principal dans ce projet est d'élucider le comportement viscoélastique des membranes thermoplastiques en ABS (Acrylonitrile butadiène styrène), HIPS (High Impact Polystyrène), PP (Polypropylène) et PVC (chlorure de polyvinyle) sous l'influence de la température et de la gravité. Dans cette optique, la mémoire est exposée à travers quatre chapitres, de la manière suivante :

Le *chapitre 1* propose une revue de la littérature sur les matériaux thermoplastiques et les processus de mise en forme les plus connus. Nous nous concentrons sur le thermoformage, et dans la deuxième partie, nous suggérons des méthodes de modélisation numérique et d'identification utilisées pour ce processus.

Le *chapitre 2* présente un aperçu sommaire des principes qui gouvernent le comportement des polymères thermoplastiques. Ce chapitre explore divers modèles mathématiques aptes à décrire le comportement des membranes thermoplastiques sous l'effet de la gravité et la température. À cet effet, le modèle de Kelvin-Voigt et le modèle visqueux à trois paramètres ont été choisis pour caractériser la manière dont se comportent les membranes composées d'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène), de HIPS (Polystyrène à Haute Résistance aux Chocs), de PP (Polypropylène) et de PVC (Chlorure de Polyvinyle).

Dans le *chapitre 3*, nous exposons la méthodologie choisie et le dispositif expérimental qui a été employé pour établir une base de données cruciale afin d'identifier les paramètres mécaniques du matériau. Les essais expérimentaux ont été menés au Laboratoire de Bioplasturgie et Nanotechnologie de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Une description du matériau utilisé est incluse, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus.

Le *quatrième chapitre* expose les résultats de l'identification. Ensuite, une analyse comparative entre deux modèles (modèle de Kelvin-Voigt et modèle visqueux à trois paramètres) est effectuée, et les variations de la viscosité en fonction de la température sont interprétées.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION AUX MATÉRIAUX PLASTIQUES.

1. Introduction

En raison des propriétés des thermoplastiques (léger, durable et extrêmement résistant à la corrosion et aux produits chimiques), la tendance actuelle est d'élargir leurs applications en tant que matières plastiques techniques pour des secteurs d'intérêts industriels tels que le transport, le médical, l'alimentation, l'électriques, etc. Pour le secteur d'automobile, plusieurs résines thermoplastiques sont visées pour la substitution des produits classiques par des produits à base de thermoplastiques, notamment l'ABS (Acrylonitrile butadiène styrène), le HIPS (High Impact Polystyrène), le PP (Polypropylène), le PET (polyéthylène téréphtalate) et le PVC (chlorure de polyvinyle). Généralement, ces matériaux ont un comportement viscoélastique, et la modélisation des procédés de mise en forme de ces thermoplastiques doit en tenir compte. C'est dans ce cadre que le travail est orienté. En conséquence, ce chapitre a pour objectif d'introduire une étude générale sur les matériaux thermoplastique notamment les matériaux tels que l'ABS, HIPS, PP et PVC, tout en évoquant les différentes techniques de la mise en forme de ses matériaux Pour étayer cette étude, une revue bibliographique est utilisée pour examiner la caractérisation viscoélastique des thermoplastiques.

2. Contexte générale

Malgré des contestations écologiques sur les plastiques synthétiques pour encourager le développement de nouveaux matériaux techniques respectueux de l'environnement (biopolymères ou à base de matériaux biosourcés), l'industrie des plastiques synthétiques, à cause de leur propriétés mécaniques (rigidité, légèreté, étanchéité, etc.), n'a cessé de croître autant aux niveaux de la production de nouveaux polymères que la fabrication ou l'amélioration de produits destinés à divers secteurs de consommations (automobile, loisirs, médical, emballage, etc.).

En ce qui concerne la plasturgie, l'intérêt est porté, généralement, sur l'utilisation des thermoplastiques pour la fabrication de produits. Cet intérêt s'explique, d'une part, par des raisons économiques et budgétaires (rapport qualité / prix, recyclable) (Abdelghani, 2009) et, d'autre part, par les propriétés recherchées par les industriels sur les produits fabriqués. De surcroît, plusieurs matériaux classiques peuvent être substitués par des matériaux thermoplastiques tels que : l'acier, le verre, le béton ou même le bois (Ben Aoun et al., 2020a), mais cette substitution impose un changement de processus de mise en forme notamment l'utilisation de nouveaux procédés industrielles comme l'injection, le thermoformage, le soufflage .

2.1. Les matériaux plastiques

Les matériaux plastiques sont groupés en trois classes principales : les résines thermodurcissables (le caoutchouc par exemple), les polymères thermoplastiques (tels que : les polyéthylènes, le polypropylène, le polychlorure de vinyle, etc.) et les élastomères (El Hadji Babacar, 2008, Miao and Hamad, 2013, Zhang, 2000).

Concernant les résines thermodurcissables sont caractérisées par une polymérisation irréversible (Ben Aoun, 2019). La polymérisation est une réaction chimique entre petites molécules de masse molaires réduites pour former une seule molécule de masse molaire plus élevées ce genre de réaction est souvent utilisé dans les catalyseurs automobiles pour brûler les hydrocarbures considérés néfaste pour l'environnement. Après polymérisation et durcissement, une montée en température ne permettra pas au produit de revenir dans son état initial (Fond and G'ssell, 2002), ainsi les résines thermodurcissables présentes une structure amorphe c'est-à-dire une structure dans laquelle les atomes ne respectent aucun ordre (comme les verres ou les polymères organiques qui présentent des structures complexe) (Ouellette, 2018). La figure 1 illustre la configuration des chaînes de polymères thermodurcissable (Ouellette, 2018).

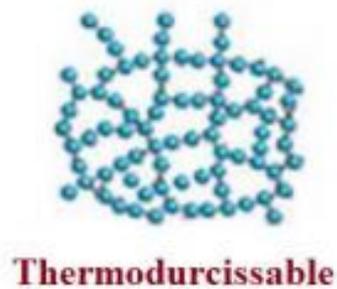


Figure 1: Configuration des chaînes de polymères thermosable (Ouellette, 2018).

Concernant les polymères thermoplastiques, ils présentent un enchaînement de monomères ou macromolécules ordonnés contrairement aux thermosables (figure 2). Sous l'effet de la température, les thermoplastiques peuvent être remodeler plusieurs fois (Tazi, 2015). Ce comportement de recyclabilité est une caractéristique propre aux matériaux thermoplastique (Hichem, 2017). La figure 2 illustre la configuration des chaînes de polymères thermoplastiques



Figure 2 : Configuration des chaînes de polymères thermoplastique (Ouellette, 2018).

Les élastomères appartiennent à la famille des thermosables et ils présentent une structure amorphe suite à une réticulation (la réticulation correspond à la formation chimique ou physique de réseaux tridimensionnelles dans la structure générale de la

substance) (Ouellette, 2018). La figure 3 illustre la configuration des chaînes d'un élastomère.

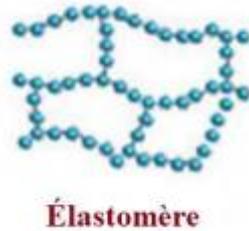


Figure 3 : Configuration des chaînes des Elastomères (Ouellette, 2018).

Parmi les thermoplastiques utilisés en plasturgie, généralement destinés à des applications ciblées, et qui font partie de ce travail on trouve : Acrylonitrile butadiène styrène (ABS), Polystyrène à haut impact (HIPS), Chlorure de polyvinyle (PVC) et Polypropylène (PP). Dans ce qui suit, des descriptions sommaires de chacun de ses matériaux est présenté.

2.1.1. Acrylonitrile butadiène styrène (ABS).

L'ABS est un polymère amorphe qui appartient à la famille des résines thermoplastiques. Il est souvent fabriqué à partir d'une réaction de polymérisation de masse en trois substance l'Acrylonitrile, le polybutadiène et le styrène (Erchiqui, 2005). Il montre une forte résistance aux chocs même dans des températures très basse. En plus, il est opaque grâce au butadiène et possède une bonne résistance chimique (Benharbit, 2007).

Il est constitué d'un enchainement non ordonné de trois monomères (voir Figures 4-6) :

- L'Acrylonitrile : composition : l'azote (N), Carbone (C), dihydrogène (H) :

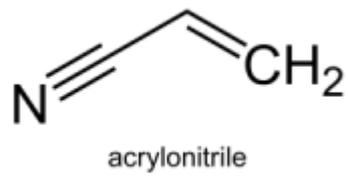


Figure 4 : représentation chimique de la molécule d'acrylonitrile

- Le butadiène est une molécule représentée comme suivant :

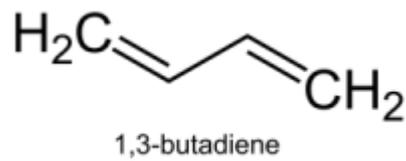


Figure 5 : représentation chimique de la molécule du butadiene

- Le styrène : C₈H₈ c'est une molécule produite industriellement à partir de pétrole.

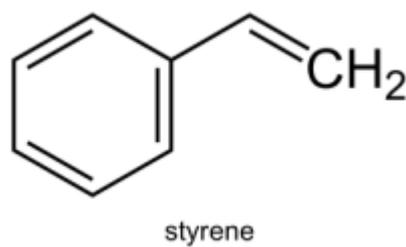


Figure 6 : représentation chimique de la molécule du styrene

2.1.2. Polystyrène à haut impact (HIPS)

Le HIPS appartient à la famille des polymères thermoplastiques c'est un mélange de polystyrène et de polybutadiène (le polybutadiène est un caoutchouc) (Benharbit, 2007) :

- Le polybutadiène est un polymère linéaire constitué de succession de monomères de butadiène. Sa structure est caractérisée par des chaînes carbonées flexibles et régulières. Il existe deux formes principales :
 - ⇒ Le polybutadiène cis, avec des groupes butyle du même côté.
 - ⇒ Le polybutadiène trans, avec des groupes butyle alternés. La structure cis confère au polymère des propriétés élastiques supérieures.

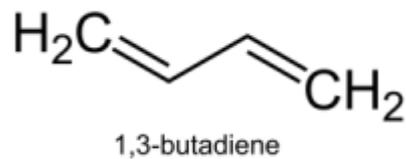


Figure 7 : représentation chimique de la molécule du butadienne

- Le polystyrène

Le polystyrène est composé de répétitions de monomères de styrène. Sa structure est formée de chaînes carbonées linéaires.

Le styrène est polymérisé pour créer des molécules de polystyrène qui s'assemblent en une structure amorphe. Le polystyrène est couramment utilisé dans les emballages, les isolants et la fabrication de produits en plastique.

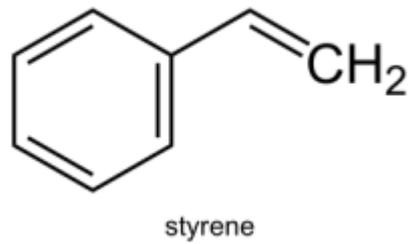


Figure 8 : représentation chimique de la molécule du styrene

2.1.3. Polypropylène (PP)

Le polypropylène (PP) est constitué de répétitions de monomères de propylène. Sa structure est principalement linéaire, avec des chaînes carbonées régulières (Ouellette, 2018). Il présente une cristallinité élevée, ce qui lui confère une résistance élevée, une faible densité et une bonne résistance chimique. Il est très utilisé dans diverses applications, notamment les emballages, les textiles, les produits médicaux et les composants automobiles.

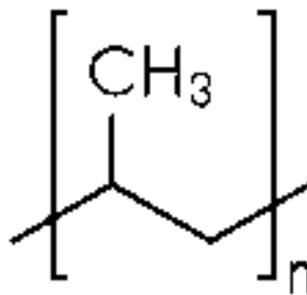


Figure 9 : représentation chimique du polypropylène

2.1.4. Chlorure de polyvinyle (PVC)

Le chlorure de polyvinyle (CPV) est couramment connu sous le nom de PVC (Polyvinyl Chloride) est un polymère thermoplastique, amorphe et semi-cristallin, connu le plus souvent sous le sigle PVC. La figure 10 illustre sa représentation (Ouellette, 2018). Sa structure est composée de répétitions de monomères de chlorure de vinyle. Les chaînes polymères du PVC sont linéaires, avec des atomes de chlore liés aux atomes de carbone adjacents. Le PVC est connu pour sa résistance chimique, sa durabilité, sa faible conductivité thermique et électrique, ainsi que sa facilité de transformation. Il est largement utilisé dans de nombreuses industries, y compris la construction, l'électronique, l'emballage, l'automobile et l'ameublement.

La structure du PVC peut être modifiée par des additifs tels que des plastifiants, des stabilisateurs et des charges. Il peut être formulé pour être rigide (PVC rigide) ou souple (PVC souple) en ajustant les quantités d'additifs utilisés.

Cependant, il est important de noter que le PVC rigide peut contenir des plastifiants, tels que les phtalates, qui ont suscité des préoccupations en raison de leur impact potentiel sur la santé et l'environnement.

Des recherches et des réglementations continuent d'être menées pour minimiser ces préoccupations et promouvoir une utilisation responsable du PVC.

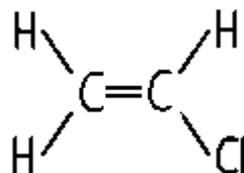


Figure 10 : représentation chimique du Chlorure de vinyle

2.2. Technique de mise en forme

En ce qui concerne la mise en forme des thermoplastiques, il existe plusieurs techniques pour la fabrication de produits. À titre d'exemple, citons les techniques classiques telles que : l'injection, le soufflage, l'extrusion, thermoformage, etc. (Titus, 1972). Chacune de ces techniques possède sa spécificité.

Généralement, les techniques de mise en forme des thermoplastiques (injection, extrusion, etc.) consistent à faire fondre le matériau au-delà de sa température de fusion T_m . Une fois la température de fusion T_m est atteinte, la liaison qui lie les chaînes moléculaires du thermoplastique est brisée par l'effet de la chaleur. En conséquence, le matériau en question peut changer de forme avec une application d'une pression adéquate. (Ouellette, 2018). Cela représente le principe de base pour la mise en forme de produit à l'aide d'un moule.

Une fois refroidit, les liaisons se reforment et le thermoplastique reprend son état caoutchouteux, la déformation est réversible. (Ouellette, 2018)

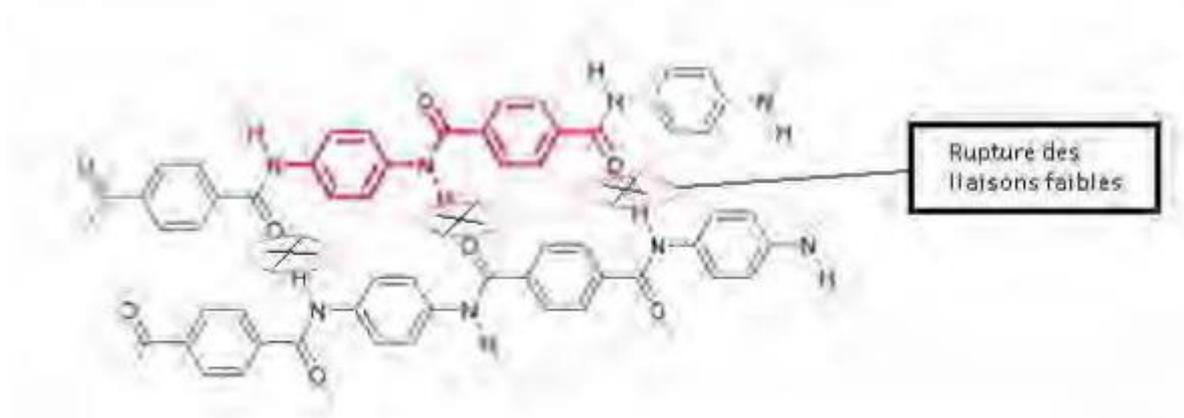


Figure 11 : Structure des liaisons dans les chaînes de polymère (Ouellette, 2018)

2.2.1. Injection, extrusion-soufflage et thermoformage

Dans cette partie nous présenterons, d'une manière sommaire, trois techniques populaires en plasturgie : injection, extrusion-soufflage et thermoformage. En général, les principes de bases de ces techniques, suivent, en générale, les mêmes étapes de fonctionnement (Ben Aoun et al., 2020b) :

- Tout d'abord préparer l'armature de polymère (Verron, 1997).
- Chauffer le polymère jusqu'à ce qu'il atteigne sa température de fusion T_m (Tazi, 2015, Verron, 1997).
- A cet effet procéder à la mise en forme du polymère à l'aide d'un moule (selon la méthode utilisée) (Tazi, 2015, Verron, 1997).
- Au contact du moule le polymère est refroidie et prend la forme de celui-ci (Tazi, 2015, Verron, 1997).
- Le produit fini est finalement prêt à être démoulé (Tazi, 2015, Verron, 1997).

2.2.1.1. *Injection*

Le principe de cette technique est le suivant : sous l'effet de la chaleur, des granules de plastiques sont ramollis et, ensuite, injectées sous haute pression, dans un moule de forme donnée. Les moules permettent la réalisation d'objets de formes désirées (Elloumi, 2016). Ce procédé de mise en forme de produits implique généralement six étapes : Phase de fermeture du moule (vitesse lente au début, rapide et ensuite lente (pour éviter le choc entre les plans de joint) ; Phase de verrouillage (Une commande applique une force de fermeture) ; Phase d'injection (phase de remplissage: matière plastifiée et maintien sous pression pour compenser les retraits ; Phase de refroidissement (imposer un temps nécessaire pour que le plastique se solidifie dans le moule) ; Phase d'ouverture du moule (une fois le plastique est refroidi, on procède au démoulage du produit; la partie mobile du moule s'écarte de la partie fixe) et finalement la Phase d'éjection : La pièce est éjectée. La figure ici-bas illustre sommairement les composantes d'un appareil d'injection. Aussi, il

est important de souligner l'importance de la vis de plastification qui assure deux fonctions essentielles : i) le transport et plastification de la matière plastique et ii) l'injection sous pression de la matière plastique fondue dans le moule. La vis est composée de 3 zones : i) zone d'alimentation et transport des granulés, ii) zone de compression (matière plastique se chauffe, se frotte, se comprime et se cisaille) et iii) zone d'homogénéisation de la matière plastique fondue (contenant des additifs). Les longueurs de chacune des trois zones et leur profil peut être différent vis-à-vis la matière plastique déployée pour l'injection (matières amorphes, matières semi-cristallines et pour matières spécifiques par exemple le PVC rigide).

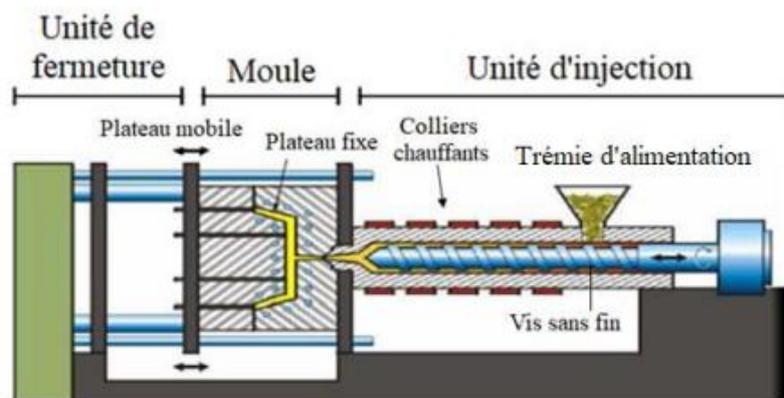


Figure 12 : Technique de moulage par injection (Gosselin, 2005)

2.2.1.2. Extrusion-soufflage

Ce procédé consiste à combiner la technique de l'extrusion avec celle du soufflage : le polymère (semi-solide) est extrudé sous forme d'un cylindre creux (paraison). De l'air comprimé est injecté pour maintenir la paraison ouverte (Elloumi, 2016). Ensuite, la paraison est pincée dans un moule (formé de deux demi-moules) ayant la forme désirée. L'air sous pression pousse la paraison contre l'empreinte du moule pour former l'objet désiré (polymère se refroidit et la pièce se solidifie et retirée). La figure 13 illustre le fonctionnement d'une extrudeuse (Lepetit et al., 2017).

Ce procédé est très utilisé par les industries plasturgiques notamment pour la fabrication des corps creux (Tazi, 2015, Verron, 1997)

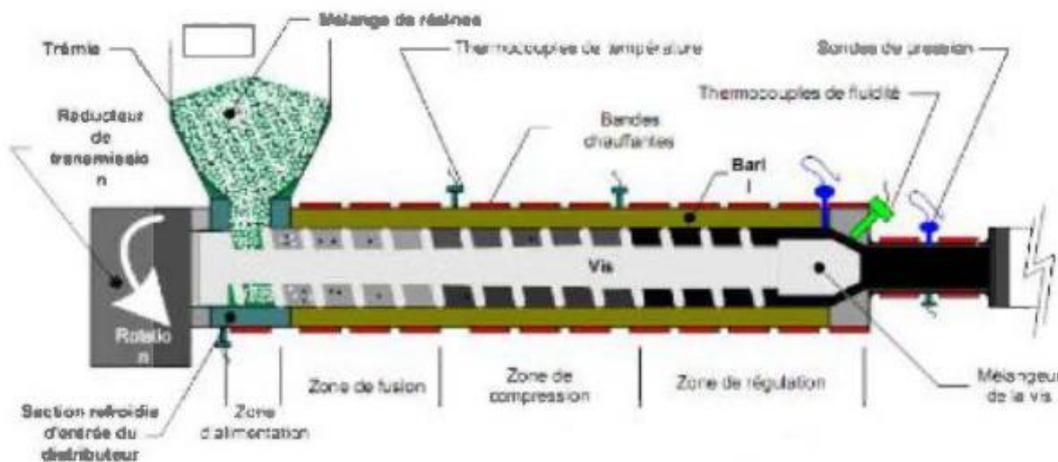


Figure 13 : Schéma de principe d'une extrudeuse (Kaoussi, 2013)

Comme le montre la figure 13 l'extrusion est un processus de fabrication où un matériau, généralement plastique ou métallique, est poussé à travers une filière pour former une forme spécifique. Une vis sans fin chauffée pousse le matériau dans un cylindre, le ramollissant. Ensuite, la pression force le matériau à travers une ouverture de forme désirée, lui donnant sa section transversale. L'extrusion est utilisée pour créer une variété de produits, des profilés en plastique aux tubes métalliques. C'est un processus continu qui permet la production de pièces de longueur indéfinie et aux formes variées avec une grande efficacité et précision.

La figure 14 illustre les trois principales étapes de l'extrusion-soufflage : 1) extrusion de la paraison, 2) fermeture de moule et 3) le soufflage de la paraison.

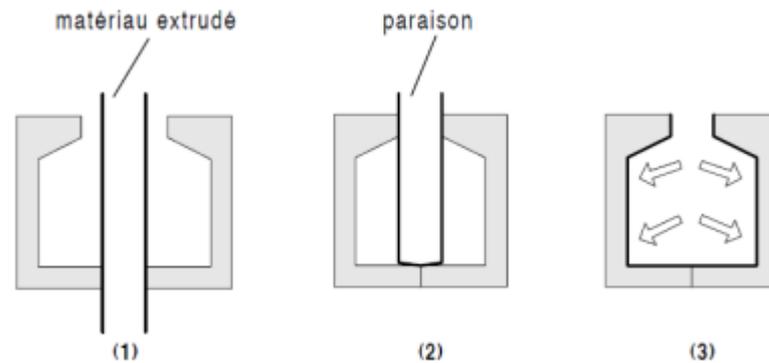


Figure 14 : Technique de moulage par extrusion-soufflage (Verron, 1997)

2.2.2. Thermoformage

Le procédé de thermoformage utilise des feuilles thermoplastiques rigides pour les transformer en objets 3D (Laroche and Erchiqui, 1999). Plusieurs secteurs industriels utilisent ce procédé (transports, l'emballages, produits de loisirs, etc.). Ce procédé consiste à former, à l'aide d'un moule, une feuille thermoplastique ramollie par chauffage (généralement par radiation infrarouge). La feuille ainsi déformée épouse la forme du moule et en refroidissant conserve sa forme. Un appareil de thermoformage est généralement constitué d'un poste de chauffage, d'un poste de formage, d'un poste de découpe et d'un poste d'empilage. Généralement, ces machines sont équipées d'automates ou commandés par ordinateur pour le réglage et le suivi des principales opérations et une reproductibilité fiable du cycle de formage pour que les objets thermoformés aient la qualité requise (Laroche and Erchiqui, 1999, Lepetit et al., 2017). Il existe plusieurs techniques pour le thermoformage de produits polymériques ; la figures 15 illustre la technique de thermoformage sous pression (Bioud, 2020) et la figure 16 celle associée au thermoformage à l'aide de deux moules (Bioud, 2020).

Généralement, le thermoformage (sous vide) implique quatre phases : fixation de la feuille thermoplastique (à l'endroit approprié de la machine) ; Chauffage de la feuille thermoplastique (Chauffage de la feuille thermoplastique à une température appropriée); Phase de formage (une fois la température de thermoformage est atteinte, retirement des

appareils de chauffage et déplacement de la feuille chaude à la station de formage) ; Phase d'évacuation d'air (aspiration d'air, entre la plaque et le moule, pour que la feuille thermoplastique adhère au moule) et Phase de refroidissement (refroidissement de la pièce thermoformée et éjection du moule).

En dépit de sa simplicité, le procédé de thermoformage demeure complexe et implique, du point scientifique, plusieurs phénomènes physiques : chauffage infrarouge, couplage fluide-structure en grandes déformations, changement de phase et microstructure. À cela s'ajoute le paramètre la température qui conditionne la qualité de produits fabriquées. En effet, il est nécessaire d'atteindre un ramollissement optimal sans dégrader les propriétés du matériau (Hamani, 2016).

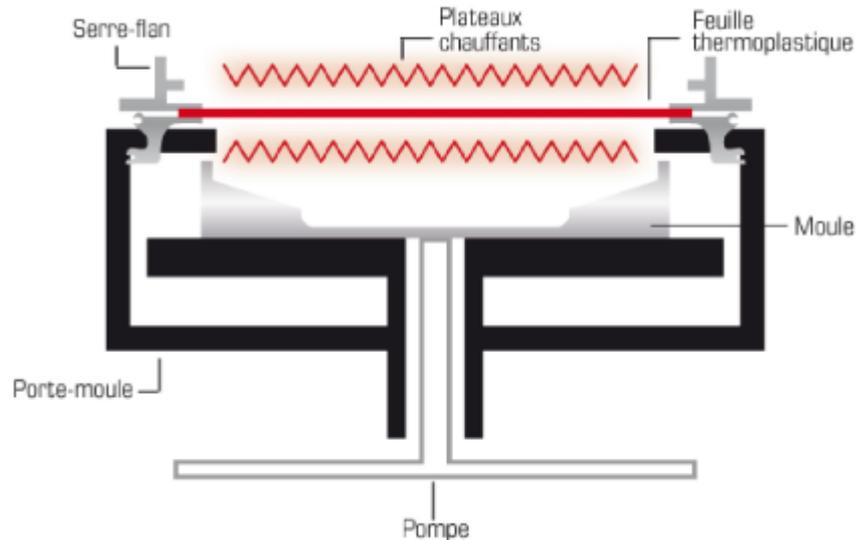


Figure 15 : Technique de thermoformage sous pression (Bioud, 2020)

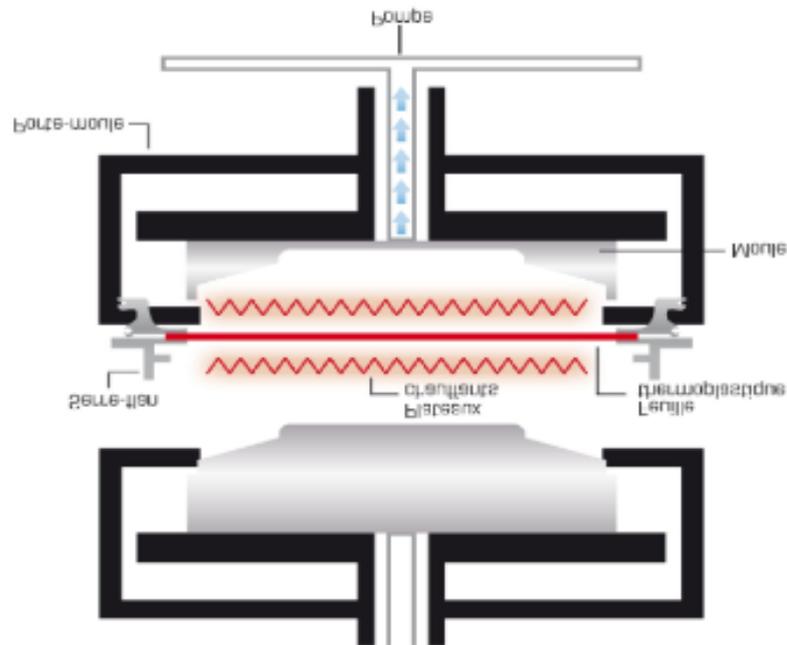


Figure 16 : Technique de thermoformage à l'aide de deux moules (Bioud, 2020)

3. Méthodes de caractérisation comportementales des thermoplastiques

En plasturgie, en général, on effectue un grand nombre d'essais avant de procéder à une production de masse. Cela occasionne des pertes en temps, en énergie et en matières (Abdelghani, 2009). Dans ces conditions, il est plus judicieux d'utiliser des outils de caractérisations expérimentales, de la modélisation numériques et de l'optimisation pour identifier le comportement des thermoplastiques en fonction de la pression et la température. Généralement, le comportement des thermoplastiques est régi par des modèles thermo-visco-élastique (Abdelghani, 2009, Benharbit, 2007, Erchiqui et al., 2010b, Tazi, 2015, Erchiqui et al., 2010a, Ben Aoun et al., 2020b). Concernant la mise en forme des thermoplastiques par thermoformage, il est nécessaire de tenir compte de deux phénomènes pour la caractérisation comportementale : i) comportement viscoélastique sous l'effet combiné des forces de gravité et la température (étape de chauffage infrarouge ou par convection) et ii) comportement viscoélastique vis-à-vis la pression et la température (étape

de formage). Toutefois, la température de chauffage doit être située entre la température de transition vitreuse (T_g) et celle de fusion du polymère (T_f).

Généralement en thermoformage, les déformations rencontrées sont généralement de type biaxial. En conséquence, pour la caractérisation expérimentale et numérique de ses déformations, il est souhaitable de considérer des montages expérimentaux qui induisent des déformations biaxiales. C'est dans ce cadre que ce projet de recherche est orienté et il concerne la caractérisation viscoélastique d'une famille de thermoplastiques sous l'effet de la température et des forces de gravités. Pour identifier le comportement viscoélastique de chaque thermoplastique, nous considérons des données issues de l'expérimentation, de la modélisation et de l'optimisation; ce qui améliore la modélisation et la simulation de thermoformage (Abdelghani, 2009).

Dans ce qui suit, nous allons détailler quelques méthodes de caractérisation du comportement des matériaux thermoplastiques les plus étudiées et exploitées par les industries de plasturgie. De ce fait, nous allons étudier quelques méthodes de caractérisation des matériaux thermoplastiques les plus appropriés dans le domaine de la plasturgie (Ben Aoun et al., 2020a).

3.1. Méthode expérimentale

Les méthodes expérimentales les plus utilisées et rapportées par la littérature sont décrites dans cette partie. À ce titre, plusieurs recherches ont résumé les différents types de tests expérimentaux qui permettent de déterminer les propriétés mécaniques et rhéologiques des thermoplastiques (Benharbit, 2007, Erchiqui et al., 2010b, Abdelghani, 2009). À cet effet, il existe plusieurs essais pour la caractérisation des polymères et qui servent à mesurer les variables tels que : la déformation, la force et le déplacement en fonction du temps et de la température. Pour les tests unidirectionnels, on peut citer comme exemple : la traction/compression uniaxiale, le cisaillement simple, la flexion et l'impact qui se révèlent comme des tests classiques (Benharbit, 2007). Cependant, il y a des tests qui font intervenir des déformations biaxiales comme dans le cas du soufflage biaxial, l'extension biaxiale et l'extension et soufflage simultanés (Benharbit, 2007, Erchiqui and Dourdour, 2005, Erchiqui et al., 2010b, Tazi, 2015, Verron, 1997).

- **Caractérisation par soufflage biaxial**

Le test de soufflage biaxial d'une membrane axisymétrique est un test très pratique pour identifier les paramètres des polymères thermoplastiques (Derdouri et al., 2000, Verron et al., 2001, Erchiqui et al., 2001). À cet effet, une membrane circulaire mince, fixée sur un support à une température donnée, est soufflée à l'aide d'une charge en débit d'air (Benharbit, 2007, Abdelghani, 2009, Verron, 1997). Ensuite, les déformations expérimentales obtenus sont ajustées par un modèle de comportement viscoélastique, par l'entremise de la modélisation numérique des équations d'équilibres. Ce type d'essai a fait l'objet de plusieurs études (Erchiqui et al., 2010a, Erchiqui et al., 2010b, Erchiqui and Derdouri, 2005, Erchiqui et al., 2007, Chevaugéon et al., 2001, Alexander, 1971, Wineman, 1976). Le problème majeur est relié à la non linéarité des équations d'équilibres qu'elles faut surmonter par des approches numériques appropriées Erchiqui and Derdouri.

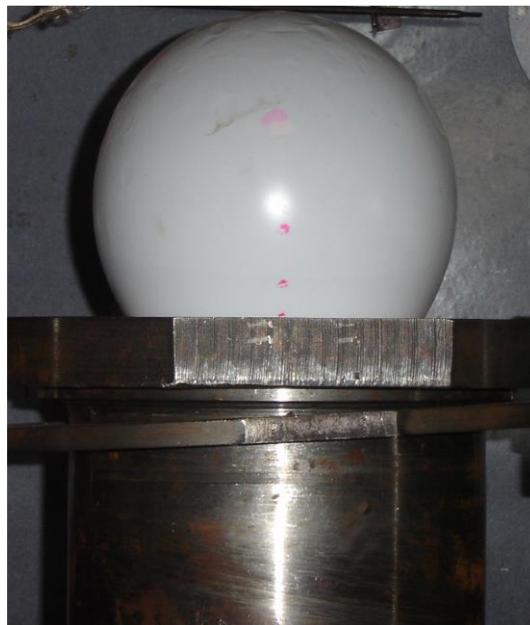
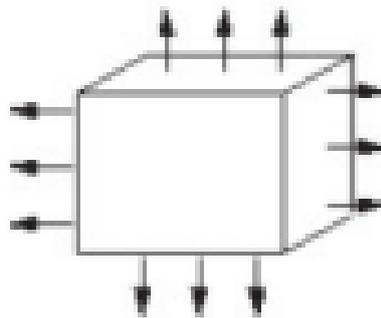


Figure 17 : Technique de caractérisation par soufflage biaxial

- **Caractérisation par extension equibiaxiale**

Cette une méthode qui peut aussi servir à la caractérisation des paramètre des matériaux thermoplastique (**Erchiqui and Derdouri, 2005, Treloar, 1944**). La figure 18 illustre ce type d'essai.



**Equibiaxial
Tension**

Figure 18 : Technique de caractérisation par extension equibiaxiale

Le test consiste à étirer une membrane thermoplastique de forme rectangulaire suivant deux directions dans un plan XY, tout en gardant la troisième direction libre (Treloar, 1944), ainsi les forces exercées dans les deux directions sont indépendantes (Verron, 1997). Toutefois le test d'extension uniaxiale peuvent induire des instabilités pour les domaines des grandes déformations (Li et al., 2001). Toutefois, selon Li et al., (2001), le test de gonflement est l'un des essais d'extension qui s'applique avec succès pour la détermination des paramètres des thermoplastiques tels que le polystyrène résistant aux chocs (HIPS), l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS).

- **Caractérisation par extension soufflage**

Ce test combine l'extrusion et le soufflage appliqués simultanément sur un cylindre creux axisymétrique en polymère (Benjeddou et al., 1993). Les force d'étirement

assurent l'extension alors que le soufflage est assuré par le débit d'air introduit. En effet, le cylindre mince est étiré suivant sa longueur au même temps qu'une pression d'air est injectée à l'intérieur de la pièce. (Verron, 1997).

Finalement, il est opportun de souligner que les paramètres mécaniques et rhéologiques, associées aux lois de comportements, puissent être obtenus à l'aide de la combinaison de méthodes l'expérimentales, de la modélisation numérique (méthode des éléments finis, méthode de volumes finis, méthodes de différences finis, etc.) et de l'optimisation (moindre carrée, réseaux de neurones, etc.) (Benharbit, 2007, Erchiqui and Derdouri, 2005).

3.2. Méthodes de modélisation numérique en mécanique

En mécanique des milieux continus, la finalité des modèles numériques est de représenter adéquatement les phénomènes physiques (transfert de chaleur, mécanique des fluides, mécanique des structure, endommagement, changement de phase, etc.) qui se présentent dans les milieux réels (industriel, environnemental, etc.) et cela, en général, dans le but de de prévoir le comportement de ses milieux. Pour l'industrie de thermoformage, les objectifs clés de la modélisation sont :

1. Diminution des temps de fabrication,
2. Automatisation des procédés,
3. Amélioration des propriétés mécaniques et conservation de l'intégrité structurelle des matériaux au fil du temps.
4. Des coûts de production maîtrisés.

Dans cette logique, les outils de simulation sont une aide précieuse pour comprendre, anticiper et appréhender les difficultés allant jusqu'à l'optimisation des procédés de fabrication (Erchiqui and Derdouri, 2005). Pour le procédé de thermoformage, la simulation numérique assure la prévention de la rupture prématurée de la membrane thermoplastique ainsi que les propriétés induites dans le produit (mécanique, optique, thermique, etc.). En outre, elle permet d'analyser les effets des conditions de mise en forme telles que la température, la pression, le temps du refroidissement, etc. sur la qualité du

produit final (Tazi, 2015). Les solutions issues de logiciels commerciaux pouvant répondre aux besoins des industriels en ce qui concerne les procédés d'élaboration de structures. Toutefois, ces logiciels de simulation reposent souvent sur des hypothèses simplificatrices fortes qui ne permettent pas de décrire de manière satisfaisante les phénomènes multi-physiques contrôlant ces procédés (Erchiqui and Derdouri, 2005). Le développement de tels outils de simulation implique la prise en charge de couplages multi-physiques avancés à l'origine de difficultés numériques. Dans ce cadre, nombreux travaux ont été menés ces dernières années pour appréhender ces difficultés (Erchiqui and Derdouri, 2005). Cependant, ces études se placent trop souvent dans des cas académiques simplifiés qui ne correspondent pas toujours à la réalité industrielle des matériaux thermoplastiques. D'après leurs expériences, DeLorenzi et Nied (1991) ont pu mettre l'hypothèse que les thermoplastiques, qui possèdent généralement des comportements viscoélastiques, portés au-dessus de leur température de transition vitreuse (T_g) peuvent être modélisés, dans certains cas, par des membranes hyperélastiques (DeLorenzi et al., 1991).

Pour la modélisation numérique, plusieurs méthodes sont disponibles dans la littérature et les plus utilisées sont : la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des différences finies (MDF) et la méthode des volumes finis (VF).

3.3 Méthode d'identification

Généralement, le problème d'identification comportementale des matériaux consiste à minimiser l'erreur entre des données expérimentales (issues des essais en contraintes-déformations, fournis par des capteurs) et les valeurs théoriques sont déterminées par des modèles théoriques (Benharbit, 2007). Pour ce type de problème, il existe plusieurs méthodes d'identification dans la littérature. À ce titre, citons les travaux sur l'identification viscoélastiques et hyper-élastiques sur les matériaux thermoplastiques (Derdouri et al., 2000; Erchiqui, 2005; Erchiqui et al., 2010; Erchiqui, Ozdemir, Souli, Ezzaidi, & Ditubangoma, 2011; Verron, Khayat, Derdouri, & Peseux, 1999). Pour ce type de problème on rencontre deux classes d'approches :

- L'identification à l'aide d'algorithmes de type moindres carrés.
- L'identification à l'aide d'algorithmes de type de réseaux de neurones.

Dans ce projet, nous avons adopté sur l'utilisation d'un algorithme de type moindre carrée pour la détermination des paramètres rhéologiques et mécaniques des matériaux : ABS, HIPS, PVC et PP.

- **Méthode des moindres carrés**

C'est une méthode basée sur des algorithmes mathématique dont les bases ont été développées de manière indépendante en littérature (Cortial, 1990). L'approche utilisée dans cette approche consiste à réajuster des données (nuage de points) qui représente généralement des observations identifiées sur un plan ou un diagramme de dispersion dont l'axe des abscisses (x) représente la variable explicative et l'axe des ordonnées (y) représente la variable mesuré (ou variable expliquée). La figure ici-bas illustre l'approche (Derdouri et al., 2000 ; F. Erchiqui et al., 2001).

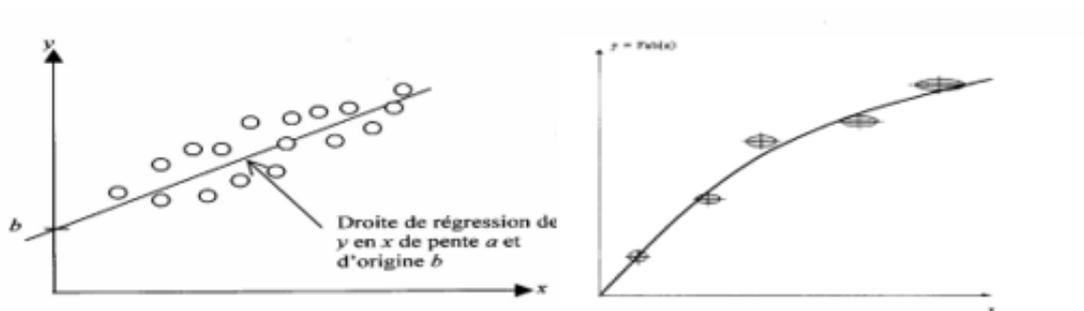


Figure 19 : Application de la méthode des moindres carrés (Cortial, 1990)

Concernant l'identification comportementale des matériaux viscoélastiques, la majorité des travaux se reposent sur l'utilisation d'algorithme des moindres carrés pour la détermination des paramètres mécaniques. (Ben Aoun, 2020). Pour ce projet, cette méthode est retenue pour minimiser la différence entre des valeurs de déformations mesurées expérimentalement (chapitre 3) et celles calculées par un modèle mathématique adapté au comportement des thermoplastiques utilisés.

La fonction qui décrit l'algorithme des moindres carrés est quadratique représentée par l'Équation 1 suivante (Ben Aoun et al., 2020a, Derdouri et al., 2000) :

$$F_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon(t)]^2 \quad (\text{Equation 1})$$

Où :

- N : Nombre de points expérimentaux.
- $\varepsilon(t)$: Erreur de prédiction commise sur l'estimation.
- θ : Paramètre à identifier par la méthode des moindres carrés.

L'erreur ε est défini comme la différence entre la réponse du système et celle du modèle mathématique

$$\varepsilon(t) = y(t) - y'(t) \quad (\text{Equation 2})$$

Où :

- $y(t)$ = sortie du système.
- $y'(t)$ = sortie du model.

L'algorithme souvent déployé pour la minimisation des erreurs, selon la méthode des moindres carrés, est celui de Levenberg-Marquardt. (Ben Aoun et al., 2020a). Cet algorithme tend à trouver une solution du système d'équations non linéaires de la forme (Ben Aoun et al., 2020a) :

$$F(x) = 0; x \in X \quad (\text{Equation 3})$$

Selon la littérature, ce type d'algorithme est robuste avec une convergence stable comparant aux plusieurs autres algorithmes d'optimisation regroupés dans le Tableau 1 (Newton, Gauss-Newton, algorithme de descente, etc.) (Ben Aoun et al., 2020a) . Le tableau ci-dessous résumé les types d'algorithmes rencontrés en littérature (Ben Aoun, 2019).

Tableau 1 Spécifications de différents algorithmes (Ben Aoun et al., 2020a)

Algorithmes	Règle de mise à jour	Convergence	Complexité de calcul
Algorithme de la descente	$w_{k+1} = w_k - \alpha g_k$	Stable, lente	Gradient
Algorithme de Newton	$w_{k+1} = w_k - H_k^{-1} g_k$	Non stable, rapide	Gradient et matrice Hessienne
Algorithme de Gauss-Newton	$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k)^{-1} J_k e_k$	Non stable, rapide	Matrice Jacobienne
Algorithme de Levenberg-Marquardt	$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k + \mu I)^{-1} J_k e_k$	Stable, rapide	Matrice Jacobienne

- **Méthode de réseaux de neurones artificiels (RNA)**

Le réseau de neurones artificiels (RNA) constitue un modèle simplifié de neurone biologique aussi appelé neurone formel (Lettvin et al., 1965). Ce type de réseaux peut théoriquement réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (Lettvin et al., 1965) et cela selon des règles bien déterminé. En effet, chaque neurone formel peut transformer ses entrées en sortie à l'aide d'une fonction de transfert (équivalent d'un automate ; (Lettvin et al., 1965), appelé fonction de transfert.

L'intérêt porté aux algorithmes d'identification concerne plusieurs domaines de la science (Yan et al., 1992, Giakoumakis et al., 1997, Erchiqui et al., 2011) ainsi que les problèmes d'identification comportementale (Benharbit, 2007). Voici une liste sommaire de l'utilisation par les réseaux de neurones :

- Préviation.
- Identification.
- Classification.
- Optimisation.
- Traitement d'image et des signaux et contrôle des procédés.
- Etc.

La figure ici-bas représente un schéma simplifié de l'architecture d'un réseau de neurones.

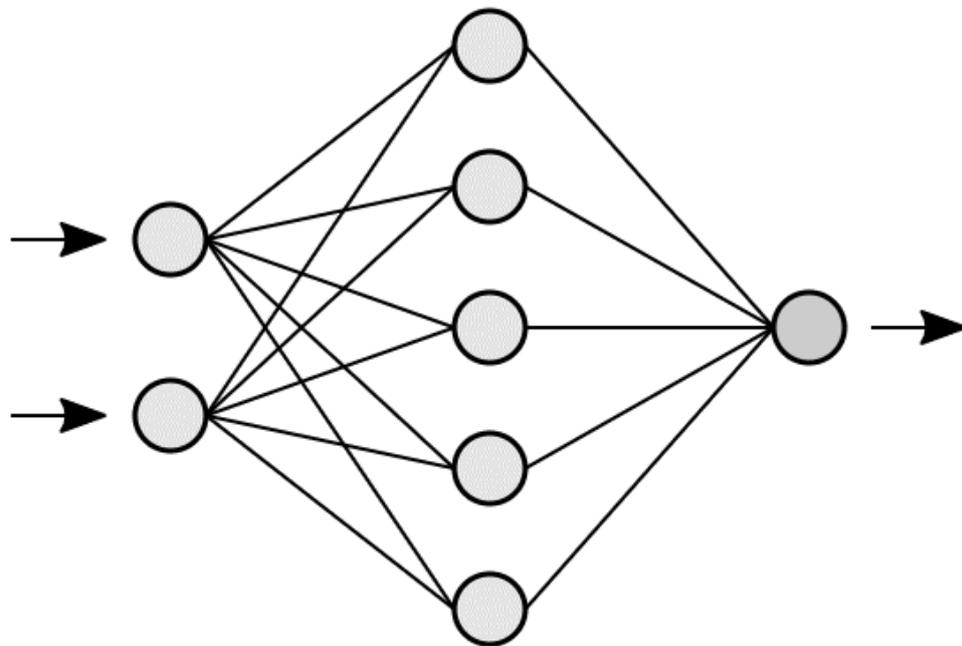


Figure 20 : Architecture d'un réseau de neurones

L'architecture d'un réseau de neurones artificiels, inspirée du fonctionnement du cerveau, est le fondement de l'apprentissage profond. Elle est constituée de couches interconnectées de neurones, chacune contribuant à la transformation des données en une forme plus abstraite et expressive. Les réseaux de neurones modernes, tels que les réseaux de neurones convolutifs (CNN) et les réseaux de neurones récurrents (RNN), ont conduit à des avancées significatives dans des domaines tels que la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel et bien d'autres (Lettvin et al., 1965).

Un réseau de neurones typique se compose de trois types de couches : les couches d'entrée, les couches cachées et les couches de sortie. Les couches d'entrée reçoivent les données brutes et les transmettent aux couches cachées. Chaque neurone dans une couche cachée effectue une combinaison linéaire des entrées, suivie d'une fonction d'activation non linéaire telle que ReLU (Rectified Linear Unit) Cela introduit de la non-linéarité dans le réseau, lui permettant de capturer des motifs complexes.

Les réseaux de neurones sont organisés en couches superposées. Les couches profondes permettent au réseau d'apprendre des caractéristiques de plus en plus abstraites à mesure que l'information est propagée de la couche d'entrée aux couches de sortie. Les CNN sont utilisés pour l'analyse d'images, utilisant des couches de convolution pour extraire des caractéristiques spatiales, suivies de couches de mise en commun pour réduire la dimension (Yan et al., 1992, Giakoumakis et al., 1997, Erchiqui et al., 2011).

Les RNN sont conçus pour traiter des données séquentielles, tels que des séquences de mots dans le traitement du langage naturel. Ils possèdent des boucles récurrentes qui permettent aux informations de circuler entre les différentes étapes temporelles. Cela rend les RNN adaptés aux tâches de prédiction de séquence (Yan et al., 1992, Giakoumakis et al., 1997, Erchiqui et al., 2011).

Les couches de sortie génèrent les prédictions finales du réseau. La conception de ces couches dépend de la nature de la tâche, par exemple, une fonction d'activation sigmoïde est couramment utilisée pour les tâches de classification binaire, tandis qu'une fonction Softmax est préférée pour la classification multiclasse (Yan et al., 1992, Giakoumakis et al., 1997, Erchiqui et al., 2011).

L'apprentissage des réseaux de neurones est réalisé souvent à l'aide d'algorithme de rétropropagation (backpropagation). Il ajuste les poids des connexions entre les neurones pour minimiser la différence entre les prédictions du réseau et les valeurs réelles. L'optimisation est réalisée à l'aide d'algorithmes d'optimisation tels que la descente de gradient stochastique (SGD) ou ses variantes plus avancées (Lettvin et al,1965).

En résumé, l'architecture d'un réseau de neurones est un agencement hiérarchique de couches interconnectées de neurones. Elle englobe les couches d'entrée, les couches cachées et les couches de sortie, qui travaillent ensemble pour transformer les données brutes en prédictions ou en représentations plus abstraites. L'architecture peut varier en fonction de la tâche et des données, avec des réseaux tels que CNN pour la vision et les RNN pour le traitement séquentiel, propulsant ainsi les progrès dans l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle (Lettvin et al,1965).

4. Problématique

4.1 Problématique

Le nombre d'expérimentations effectué en thermoformage, avant une production de masse, nécessite généralement beaucoup de temps et de coût en matière et en ressource techniques. Afin de remédier ce problème, plusieurs industries en thermoformage recourt à l'utilisation de la conception assistée par ordinateur (CAO) pour l'analyse et l'optimisation de la fabrication de leurs produits. Toutefois, la conception de produits à l'aide de CAO nécessite la connaissance du comportement des thermoplastiques. Concernant le comportement des thermoplastiques sous l'effet combiné des forces de gravité et de la température, en thermoformage, il ne semble pas être élucidé et particulièrement à l'étape de chauffage. C'est dans ce cadre que le projet est orienté et il veut contribuer par la caractérisation viscoélastique d'une famille de membrane thermoplastique sous l'effet de la température et de la gravité : ABS (Acrylonitrile butadiène styrène), HIPS (High Impact Polystyrène), PP (Polypropylène) et PVC (chlorure de polyvinyle).

4.2 Objectifs

4.2.1. Objectif générale

L'objectif générale du projet est d'identifier numériquement le comportement viscoélastique d'une famille de membrane thermoplastique sous l'effet de la température et de la gravité (ABS, HIPS, PP, PVC). Pour cela, des outils expérimentaux, de modélisation et d'optimisation seront utilisés.

4.2.2. Objectifs spécifiques

- Expérimenter l'affaissement d'une famille de membranes thermoplastiques (ABS, HIPS, PP, PVC) au cours du temps pour différentes températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C) ;
- Choisir des lois viscoélastiques appropriées pour représenter l'affaissement des thermoplastiques sous l'effet de la chaleur et la gravité.
- Chois un algorithme d'optimisation appropriés pour le problème d'identification
- Identifier le comportement viscoélastique de chaque matériau thermoplastique ;
- Utiliser un modèle thermique appropriés pour décrire les paramètres mécaniques, associés aux lois de comportement, vis-à-vis la température et la gravité

4.3 Hypothèses

- Chaque membrane est supposée plane avec une épaisseur constante.
- Chaque matériau utilisé est supposé homogène, isotrope et incompressible.
- Chaque membrane a un comportement viscoélastique.
- Comportement viscoélastique est décrit par le model de Kelvin-Voigt*.
- Allure de la déformation, au pôle de chaque membrane, peut être représentée par une courbe polynomiale.

CHAPITRE 2 : MODELES DE COMPORTEMENT DES POLYMERES THERMOPLASTIQUES.

1. Généralités

Les matériaux thermoplastiques peuvent être représentés par des modèles prédéfinis dans la littérature, ces modèles sont le résultat d'une combinaison de comportements élastiques, plastique ou visqueux (Zhi-Qiang, 2005). Sur cette base, le comportement de chaque matériau peut être représenté par la combinaison de 3 types d'éléments mécaniques élémentaires (Liang, 2016, Ouellette, 2018) :

- ⇒ Ressort : cet élément mécanique représente parfaitement la loi de Hook. Pour une charge en déformation donnée, ce modèle suggère une réponse linéaire de la contrainte induite dans le matériau (Ben Aoun, 2019). Le coefficient de proportionnalité, entre contrainte et déformation, n'est le coefficient d'élasticité (E) du matériau. La figure ici-bas représente schématiquement ce comportement.

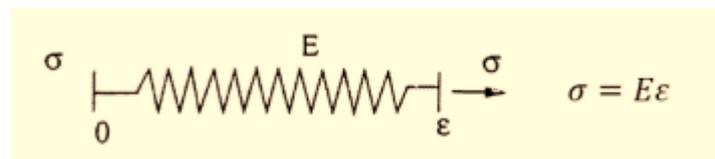


Figure 21 : Modèle décrivant le comportement de matériaux élastiques (Zhi-Qiang, 2005)

- ⇒ Amortisseur : cet élément mécanique représente la viscosité linéaire. De même, pour une charge en taux de déformation donnée $\dot{\epsilon}$ (vitesse de déformation), ce modèle suggère une réponse linéaire de la contrainte induite dans le matériau (Ben Aoun, 2019). Le coefficient de proportionnalité, entre contrainte et la vitesse de déformation, n'est le coefficient de viscosité du matériau (η) du matériau. La figure ici-bas représente schématiquement ce comportement.

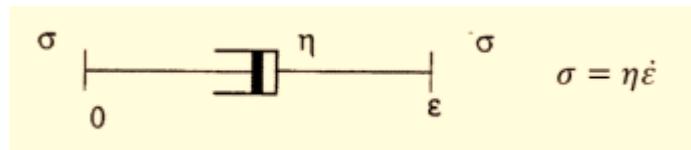


Figure 22 : Modele décrivant le comportement de matériaux visqueux (Zhi-Qiang, 2005)

⇒ Patin : décrit un comportement plastique permanent et non réversible à partir d'un certain seuil représenté dans la figure ci-dessous (Ben Aoun,2019).

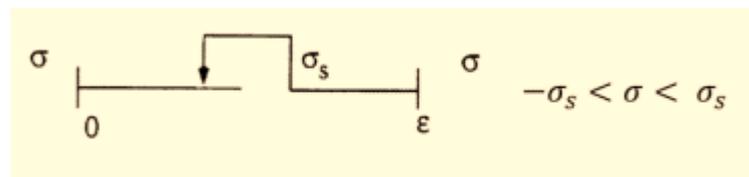


Figure 23 : Modele décrivant le comportement de matériaux plastique (Zhi-Qiang, 2005)

2. Modèle de comportement élastique

Le comportement élastique d'un matériau traduit une déformation réversible et proportionnelle à la contrainte (Saifouni, 2014), elle est caractérisé par une équation linéaire qui fait la relation entre la déformation (ϵ) et la contrainte appliqué (σ) sur le matériau (Chevalier, 1988, Bazant, 1972).

La Figure 27 représente le comportement d'un matériau la partie linéaire du matériau représente son comportement élastique cette partie est caractérisé par une déformation réversible ce qui justifie sa substitution par un ressort :

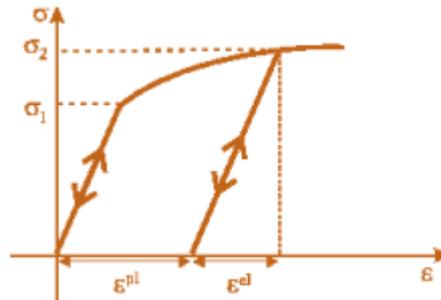


Figure 24 : Comportement élastoplastique (Ouellette, 2018)

Dans le cas d'un matériau isotrope la loi de Hook est utilisée, elle décrit notamment le comportement élastique du matériau comme décrit précédemment suivant la formule suivante (Ben Aoun, 2019) :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Equation 4})$$

Un matériau chargé cherche toujours à reprendre son état initial une fois les contraintes ne sont relâchées (Ben Aoun,2019).

3. Modèle de comportement viscoélastique

Concernant les matériaux thermoplastiques, il existe plusieurs modèles analogiques qu'on peut trouver dans la littérature notamment celui de Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener, Burger, Lodge, Christensen, etc. Le choix du bon modèle de comportement dépend fortement de la nature des molécules formant le matériau. Généralement, ces modèles sont construits à partir de l'association des composant ressorts (pour l'aspect comportemental de type

élastique) et/ ou amortisseur (pour l'aspect comportemental de type visqueux) (Moreau, 2007). Dans la section suivante, quelques modèles de comportement sont présentés.

3.1 Le modèle de Maxwell

Ce modèle représente les matériaux dont le comportement peut être représenté par la combinaison en série d'un ressort ayant un module élastique E (qui traduit le comportement élastique linéaire) et un amortisseur ayant un coefficient de viscosité η (qui traduit le comportement visqueux) (Moreau, 2007)

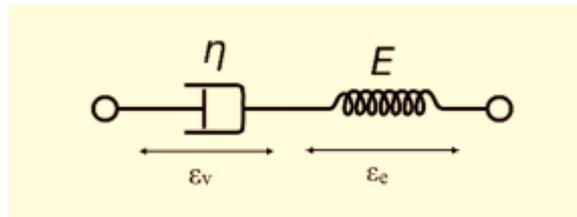


Figure 25 : Représentation schématique du modèle de Maxwell (Ben Aoun,2019)

Ce modèle est le plus simple et il est caractérisé par les équations suivantes :

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_v \quad (\text{Equation 5})$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_e = \sigma_v \quad (\text{Equation 6})$$

Donc

$$\dot{\epsilon}_{tot} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_v \quad (\text{Equation 7})$$

- ϵ_{tot} = déformation totale formée par la somme de la déformation (ϵ_e) et (ϵ_v).
- ϵ_e = présente la déformation élastique du ressort.
- ϵ_v = présente la déformation anélastique de l'amortisseur.

- σ_{tot} = présente contraintes totale de la sommes de (σ_e) et (σ_v) .
- σ_e = présente contraintes dans le ressort.
- σ_v = présente contraintes dans l'amortisseur.
- $\dot{\epsilon}'_{tot}$ = dérivé de la déformation totale formée par la somme de la déformation (ϵ_e) et (ϵ_v) .
- $\dot{\epsilon}'_e$ = dérivé de la déformation élastique du ressort.
- $\dot{\epsilon}'_v$ = dérivé de la déformation anélastique de l'amortisseur.

D'après la figure précédente :

$$\sigma_e = E \epsilon_e \quad (\text{Equation 8})$$

$$\sigma_v = \eta \frac{d\epsilon_v}{dt} \quad (\text{Equation 9})$$

Donc on peut écrire :

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_v = \frac{\sigma_e}{E} + \frac{\sigma_v}{\eta} \Rightarrow E \dot{\epsilon}_{tot} = \dot{\sigma} + \frac{E}{\eta} \sigma \quad (\text{Equation 10})$$

En ce qui concerne un essai de fluage (Figure 27), la contrainte est constante, c-à-d $\dot{\sigma} = 0$. En conséquence, la vitesse de déformation demeure constante (El Hadji Babacar, 2008, Zhi-Qiang, 2005) suivant l'équation :

$$E \dot{\epsilon}_{tot} = \sigma + \frac{E}{\eta} \sigma \quad (\text{Equation 11})$$



Figure 26 : Essai de fluage représenté par le modèle de Maxwell (Liang,2016)



Figure 27 : Essai de fluage représenté par le modèle de Maxwell (Liang, 2016)

L'essai de relaxation en l'occurrence présente une déformation constante donc une vitesse de déformation constante (Moreau, 2007).



Figure 28 : Essai de relaxation représenté par le modèle de Maxwell (Liang,2016)

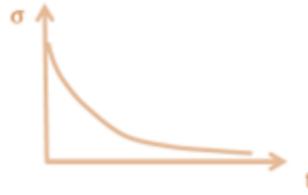


Figure 29 : Essai de relaxation représenté par le modèle de Maxwell (Liang, 2016)

Si la vitesse de déformation est nul, on a selon l'équation 11 :

$$\dot{\sigma} + \frac{E}{\eta} \sigma = 0 \quad (\text{Equation 12})$$

Donc la résolution de cette équation aboutit au résultat suivant :

$$\sigma = \varepsilon_0 E e^{-\frac{E}{\eta} t} \quad (\text{Equation 13})$$

3.2 Le modèle Kelvin-Voigt

Le modèle de Kelvin-Voigt représente les matériaux dont le comportement peut être représenté par la combinaison en parallèles d'un ressort ayant un module élastique E (qui traduit le comportement élastique linéaire) et un amortisseur ayant un coefficient de viscosité η (qui traduit le comportement visqueux). Ce modèle est caractérisé par une déformation totalement réversible et l'amortisseur traduit un comportement non réversible (Ben Aoun,2019)

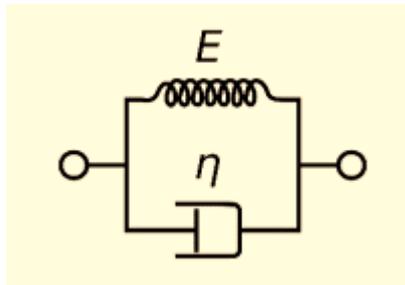


Figure 30 : Représentation schématique du modèle de Kelvin-Voigt (Ben Aoun, 2019)

Dans ce système le contrainte et la déformation sont représenté comme suivant (Fortunier, 2001) :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_e = \boldsymbol{\varepsilon}_v & \text{(Equation 14)} \\ \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_e + \boldsymbol{\sigma}_v = E\boldsymbol{\varepsilon}_e + \eta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v & \text{(Equation 15)} \end{cases}$$

- $\boldsymbol{\varepsilon}$ = déformation totale équivalente à la déformation ($\boldsymbol{\varepsilon}_e$) et ($\boldsymbol{\varepsilon}_v$).
- $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ = présente la déformation élastique du ressort.
- $\boldsymbol{\varepsilon}_v$ = présente la déformation anélastique de l'amortisseur.
- $\boldsymbol{\sigma}$ = présente la contraintes totale de la sommes de ($\boldsymbol{\sigma}_e$) et ($\boldsymbol{\sigma}_v$).
- $\boldsymbol{\sigma}_e$ = présente la contraintes dans le ressort.
- $\boldsymbol{\sigma}_v$ = présente la contraintes dans l'amortisseur.
- E : Module de rigidité du matériau (Pa)
- η : Viscosité du matériau (Pa.s)

Pour un effet de fluage l'application d'une contrainte constante traduit une déformation retardée qui est entièrement récupérable une fois la contrainte n'est plus appliquée (Liang, 2016) :



Figure 31 : Essai de fluage représenté par le modèle de Kelvin-Voigt (Liang, 2016)

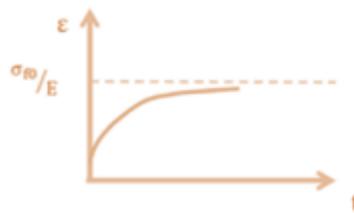


Figure 32 : Essai de fluage représenté par le modèle de Kelvin-Voigt (Liang, 2016)

- σ_0 : Contrainte appliquée (Pa)
- E : Module de rigidité du matériau (Pa)
- η : Viscosité du matériau (Pa.s)
- t : Durée de la déformation (s)

Du coup dans ce cas on pourra résoudre l'équation différentielle précédente pour une solution suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right) \quad (\text{Equation 16})$$

3.3 Le modèle Burger

Le comportement des polymères est souvent représenté par le modèle de burger, il illustre généralement un comportement viscoélastique, qui semble représenter adéquatement une grande famille des thermoplastiques (Malkin and Isayev, 2017). Ce modèle est constitué d'une combinaison entre les modèles de kelvin-Voigt et Maxwell (Liang, 2016, Ouellette, 2018). La figure ci-dessous illustre ce comportement

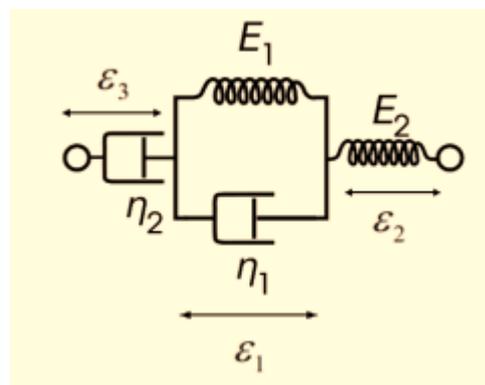


Figure 33 : Modèle de Burgers (Ben Aoun, 2019)

Comme tous les autres modèles la déformation et la contrainte de ce modèle peut être représenté comme suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = E_2 \varepsilon_2 = E_1 \varepsilon_1 + \eta_1 \dot{\varepsilon}_1 = \eta_2 \dot{\varepsilon}_3 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(Equation 17)} \\ \text{(Equation 18)} \end{array}$$

- σ_0 : Contrainte appliquée (Pa)
- E_i : Module de rigidité du matériau (Pa)
- η_i : Viscosité du matériau (Pa.s)
- t : Durée de la déformation (s)

Pour un essai de fluage (Liang, 2016) :

$$\varepsilon = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right) + \frac{t}{\eta_2} \right) \quad (\text{Equation 19})$$

Pour un test de relaxation :

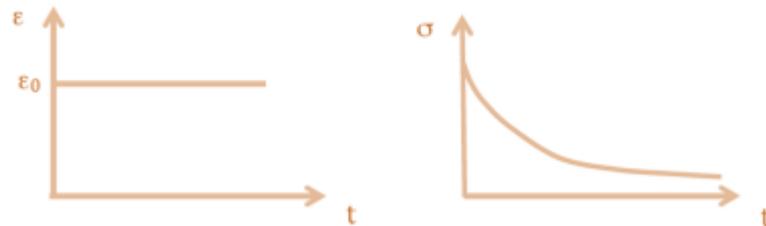


Figure 34 : Test de relaxation représenté par un modèle de Burgers (Liang, 2016)

Ainsi la variation de la contrainte est exprimé de la manière suivante (Liang, 2016) :

$$\sigma = C_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + C_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (\text{Equation 20})$$

- C_i : Constantes en fonctions des paramètres rhéologiques du modèle
- τ_i : Durée de la déformation (s)

4. Modèle de comportement hyper-élastique

Les polymères thermoplastiques sont généralement modélisés par des modèles viscoélastiques (kelvin-Voigt, Burger, Maxwell, Kelvin-Voigt généralisé, Zener, Lodge, Christensen etc)(Erchiqui et al., 2010a). Toutefois, il existe matériaux qui possèdent un comportement qui s'approche à celui des élastomères. Pour cette classe des matériaux, il

est plus souvent plus approprié d'utiliser des modèles de comportement de type hyperélastique (Ben Aoun, 2019).

Les modèles les plus généralement utilisés, pour représenter les polymères hyperélastiques en thermoformage, sont ceux de type néo-hookéen et d'Ogden (Erchiqui and Derdouri, 2005, Erchiqui et al., 1998).

4.1 Le modèle de Money-Rivlin

Lors de la modélisation du thermoformage des polymères thermoplastiques, certaines hypothèses sont introduites pour l'analyse. Parmi ces hypothèses, on trouve le comportement hyperélastique du thermoplastique, l'incompressibilité du matériau et l'utilisation d'un état plan des contraintes. En conséquence de ces hypothèses, les composantes du tenseur de Cauchy, qui est utilisé dans les modèles hyperélastiques, présentent des caractéristiques spécifiques. Ces caractéristiques découlent de la façon dont le matériau réagit sous les forces appliquées lors du thermoformage, et sont essentielles pour comprendre et prédire son comportement (Erchiqui & Derdouri, 2005). Parmi les modèles les plus utilisés on trouve celui de Monney-Rivlin (Mooney, 1940; Rivlin, 1948) et celui d'Ogden (Ogden,1972).

L'équation ci-dessous représente le modèle général pour un matériau isotrope et incompressible de type Monney-Rivlin (Mooney, 1940; Rivlin, 1948) :

$$W = \sum_i^M \sum_j^N C_{ij} \cdot (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (\text{Equation 21})$$

Où :

- W = l'énergie de déformation

- C_{ij} : Constantes matérielles de ce modèle déterminé expérimentalement.
- $I_1 = \text{tr}(C)$
- $I_2 = \frac{1}{2} [(\text{tr}(C))^2 - \text{tr}(C^2)]$

4.2 Le modèle de Ogden

Le modèle d'Ogden, proposé par Ogden en 1972 (Ogden, 1972), définit la fonction d'énergie de déformation (W) en fonction des élongations principales λ_1 , λ_2 et λ_3 du tenseur de déformation de Cauchy (C). Cette fonction d'énergie de déformation (équation 48) est exprimée comme la somme suivante :

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (\text{Equation 22})$$

Dans cette équation, μ_n et α_n sont des coefficients de matériau spécifiques qui dépendent des propriétés élastiques du matériau. Les coefficients μ_n représentent la rigidité du matériau, tandis que les coefficients α_n contrôlent la sensibilité du matériau aux déformations principales. La somme est effectuée sur tous les termes n dans le modèle.

Cette formulation permet de quantifier l'énergie de déformation associée aux différentes élongations principales et de prédire le comportement mécanique du matériau. Le modèle d'Ogden est couramment utilisé pour modéliser les comportements hyperélastiques des lastomères, en particulier dans le domaine de la biomécanique et de la mécanique des matériaux.

Il convient de noter que cette équation est une représentation générale du modèle d'Ogden, et que les valeurs spécifiques des coefficients μ_n et n_i peuvent varier en fonction du matériau étudié. La sélection appropriée de ces coefficients est cruciale pour obtenir une bonne correspondance entre les prédictions du modèle et les résultats expérimentaux.

5. Modèle thermomécanique relative à la viscosité

Généralement, les paramètres mécaniques associés aux modèles de comportement viscoélastique peuvent être reliés à la température des modèles thermiques. Parmi ces modèles on trouve le modèle (loi) de William, Landel et Ferry (WLF) (Ben Aoun N, 2019). Dans ce qui suit, une description sommaire de ces lois.

5.1. Loi de William, Landel et Ferry (WLF)

À part la loi d'Arrhenius, il existe la loi WLF pour décrire la viscosité des matériaux avec la température. Dans ce modèle, la viscosité à une température de référence (T_{ref}) et la viscosité de référence (η_0) sont reliées par l'Équation suivante (Moreau, 2007, Ben Aoun, 2019) :

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp\left(\frac{-C_1(T-T_{ref})}{T-T_{ref}+C_2}\right) \quad (\text{Equation 23})$$

- T_{ref} : Température de référence : $T_{ref} = 100^\circ\text{C}$
- η_0 : Viscosité de référence : Pa.s
- R : Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- E_a : Énergie d'activation : J/mole
- C_1 et C_2 deux coefficients constantes

CHAPITRE 3 : MODÉLISATION EXPERIMENTALES ET NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT VISCOÉLASTIQUE DES MEMBRANES SOUS L'EFFET DE LA GRAVITÉ ET DE LA TEMPÉRATURE.

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence les données nécessaires pour parvenir à identifier numériquement le comportement viscoélastique d'une famille de membrane thermoplastique sous l'effet de la température et de la gravité (ABS, HIPS, PP, PVC). Pour cela, nous considérons le problème de l'affaissement de membranes sous l'effet de la chaleur et des forces de la gravité.

L'expérience de l'affaissement des matériaux (ABS, HIPS, PP, PVC) a pour objectif de mesurer le déplacement vertical (hauteur) au pôle de la membrane thermoplastique en fonction de la température et le temps. A cet effet, un montage expérimental (chambre environnementale) disponible à l'UQAT (Laboratoire de la plasturgie) sera utilisé. La collecte des données au cours de cette partie expérimentale a pour objectif la mesure :

1. De déplacement verticales au pôle de la membrane (z),
2. Du temps (t) associé à chaque déplacement et la température (T) à l'intérieur de la chambre environnementale

Ensuite, ces données collectées seront exploitées pour le problème d'identification viscoélastique, à l'aide d'une approche mathématiques, de chaque matériau thermoplastique (ABS, HIPS, PP, PVC).

1.1. Méthodologie

La méthodologie utilisée est la suivante :

1. Mesure, à l'aide Montage expérimental, de l'affaissement des membranes (ABS, HIPS, PP, PVC) dans le temps sous l'effet de la température et de la gravité
2. Collecte des données expérimentales relative aux variable, temps, affaissement et température;
3. Modélisation mathématique de l'affaissement des membranes (ABS, HIPS, PP, PVC) sous l'effet de la température et de la gravité pour différentes températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C).
4. Identification du comportement viscoélastique de la famille de membranes thermoplastiques sous l'effet de la température et de la gravité (ABS, HIPS, PP, PVC).

1.2. Matériaux

Les matériaux utilisés dans ce projet ont été choisi comme matériaux d'essai pour le projet. Parmi les caractéristiques avantageuses de ces matériaux, on peut citer leurs résistances aux produits chimiques et à la corrosion, leurs résistances aux chocs, leurs flexibilités, leurs faibles coûts et leurs capacités de soudage. Toutefois, il est important de noter qu'ils présentent une résistance limitée aux agents oxydants :

1.2.1 HIPS (*High Impact Polystyrène*)

Le HIPS, acronyme de "High Impact Polystyrene" (polystyrène à haute résistance aux chocs), est un polymère thermoplastique qui appartient à la famille des styréniques. Il est étroitement lié au polystyrène standard, mais sa formulation inclut généralement des additifs qui lui confèrent une bien meilleure résistance aux chocs et une plus grande ténacité. La structure chimique du HIPS est essentiellement constituée de chaînes

polymères de styrène, mais elle est modifiée pour inclure des élastomères, tels que le polybutadiène, qui sont dispersés dans la matrice de polystyrène. Cette combinaison de composants lui permet de combiner les propriétés du polystyrène, telles que la facilité de transformation et la clarté, avec une résistance supérieure aux impacts.

La principale caractéristique du HIPS est sa résistance aux chocs. Cette propriété est essentielle pour de nombreuses applications, en particulier celles où la durabilité et la résilience sont nécessaires. Le HIPS est souvent utilisé pour fabriquer des produits qui sont sujets à des contraintes mécaniques, tels que des boîtiers d'appareils électroniques, des emballages, des jouets, des pièces automobiles et bien d'autres.

En raison de sa nature amorphe, le HIPS est également transparent, ce qui en fait un matériau idéal pour des applications où la clarté est importante. Cependant, sa transparence peut varier en fonction de la formulation et de l'épaisseur de la pièce, et il peut être modifié pour obtenir différentes finitions de surface, allant de brillantes à mates.

Le HIPS est relativement facile à traiter par diverses méthodes de fabrication, telles que l'extrusion, le moulage par injection et le thermoformage. Sa grande facilité de transformation en fait un choix populaire pour les applications nécessitant des formes complexes et pour lesquelles la vitesse de production est un critère important.

Cependant, il est essentiel de noter que le HIPS a ses limitations. Comme le polystyrène, il est sensible aux rayons UV, ce qui signifie qu'une exposition prolongée à la lumière solaire peut entraîner une dégradation et un jaunissement du matériau. Par conséquent, il est souvent nécessaire d'ajouter des stabilisants UV pour prolonger sa durée de vie lorsqu'il est utilisé à l'extérieur.



Tableau 2 dimension de la membrane HIPS

Diamètre (D)	187mm
Épaisseur (e)	1,6263mm

Figure 35 : membrane circulaire découpée (HIPS)

Dans le cadre des essais expérimentaux, chaque membrane en HIPS utilisée présente une épaisseur uniforme de 1,62 mm et un diamètre de 18,7 cm. Les températures utilisées sont 100°C, 110°C, 120°C, 130°C et 140°C. Le capteur de position est positionné au-dessus du montage, alignant le rayon laser au centre de la membrane après un ajustement. Son objectif est d'enregistrer les hauteurs (selon z) au pôle de la membrane.

1.2.2 ABS (*Acrylonitrile butadiène styrène*)

L'acrylonitrile butadiène styrène, communément désigné sous l'acronyme ABS, est un polymère thermoplastique amorphe résultant de la polymérisation de trois monomères distincts : l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène. Cette combinaison complexe de monomères confère à l'ABS des propriétés mécaniques et physiques uniques, ce qui en fait un matériau extrêmement polyvalent avec une large gamme d'applications industrielles. Il est reconnu pour sa résistance à l'impact, une caractéristique essentielle dans de nombreuses applications où la durabilité et la résilience sont primordiales. Cette résistance aux chocs est principalement attribuée à la présence du monomère butadiène, qui confère une élasticité au matériau. Les objets fabriqués à partir d'ABS peuvent absorber des contraintes mécaniques sans se fissurer, ce qui en fait un choix privilégié pour la production de pièces soumises à des conditions exigeantes. Outre sa résistance aux chocs, l'ABS présente une résistance chimique considérable, notamment face à de nombreux solvants organiques et à certaines substances chimiques agressives. Cela en fait un matériau prisé pour des applications où une résistance aux produits chimiques est nécessaire, comme dans la fabrication de tuyaux, de réservoirs ou de composants industriels.

Une autre caractéristique importante de l'ABS est sa résistance à la chaleur et sa stabilité dimensionnelle. Cette stabilité permet au matériau de conserver sa forme et ses propriétés mécaniques, même à des températures relativement élevées. Cela en fait un choix idéal pour des applications qui requièrent des performances constantes dans des environnements thermiquement exigeants, comme les pièces automobiles sous le capot ou les produits électroniques. En plus, il offre une bonne adhérence aux colorants et aux additifs, ce qui lui permet d'être facilement teinté dans une vaste gamme de couleurs, ou d'être modifié avec des additifs pour obtenir des propriétés spécifiques, telles que la résistance aux UV

ou la conductivité électrique. Cette polyvalence de personnalisation en fait un choix idéal pour des applications où l'aspect esthétique est important.

Cependant, il est essentiel de noter que l'ABS présente quelques inconvénients. Il peut se dégrader sous l'effet des rayons UV du soleil, ce qui limite son utilisation en extérieur sans une protection adéquate, comme un revêtement protecteur. De plus, l'ABS peut avoir une légère tendance à se déformer lorsqu'il est exposé à des températures très élevées, nécessitant une attention particulière lors de la conception de pièces destinées à des environnements chauds.

Dans le cadre de notre étude nous avons mesurer l'affaissement de celui-ci pour pouvoir déduire sont identification.



Tableau 3 dimension de la membrane ABS

Diamètre (D)	187mm
Épaisseur (e)	0,6mm

Figure 36 : membrane circulaire découpée (ABS)

Dans le cadre des essais expérimentaux, chaque membrane en ABS utilisée présente une épaisseur uniforme de 0,6 mm et un diamètre de 18,7 cm. Les températures étudiées sont 100°C, 110°C, 120°C, 130°C et 140°C. Le capteur de position est positionné au-dessus du montage, alignant le rayon laser au centre de la membrane après un ajustement. Son objectif est d'enregistrer les hauteurs (selon z) au pôle de la membrane.

1.2.3 PP (Polypropylène)

Le polypropylène (PP) est l'un des polymères thermoplastiques les plus largement utilisés et polyvalents de nos jours, allant de l'emballage à l'automobile, en passant par l'électronique et les produits de consommation. Le polypropylène est obtenu à partir de la polymérisation du propylène, un gaz issu du raffinage pétrochimique. Il se caractérise par sa légèreté, sa résistance mécanique, sa faible absorption d'humidité et sa résistance à de nombreux produits chimiques. Ces propriétés font du polypropylène un choix privilégié pour une vaste gamme d'applications industrielles et de consommation. En termes de fabrication, le polypropylène peut être produit sous différentes formes, notamment le polypropylène homopolymère et le polypropylène copolymère. Le polypropylène homopolymère est principalement utilisé dans des applications où la rigidité et la résistance sont essentielles, telles que les pièces d'automobile, les dispositifs médicaux et les équipements sportifs. Les polypropylènes copolymères, quant à eux, présentent une meilleure résistance à l'impact et à la déformation, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une certaine flexibilité, comme les emballages flexibles, les tapis et les produits moulés.

Le domaine de l'emballage est l'un des plus grands consommateurs de polypropylène. Les films et les feuilles de polypropylène sont utilisés pour fabriquer des sacs, des films rétractables, des étiquettes, des emballages alimentaires et bien plus encore. Sa transparence, sa facilité de scellage et sa résistance à l'humidité en font un choix idéal pour protéger et présenter divers produits.

Dans l'industrie automobile, le polypropylène est utilisé pour fabriquer des pièces intérieures et extérieures en raison de sa légèreté et de sa durabilité. Les pare-chocs, les tableaux de bord, les panneaux de porte et les composants de sièges sont souvent fabriqués à partir de polypropylène pour réduire le poids du véhicule et améliorer son efficacité énergétique.

Le secteur de l'électronique bénéficie également des propriétés isolantes et des caractéristiques chimiques du polypropylène. Il est utilisé pour la fabrication de condensateurs électriques, qui stockent et libèrent de l'énergie électrique. Ces

condensateurs sont essentiels dans les dispositifs électroniques, des téléphones portables aux équipements médicaux en passant par les systèmes de communication.

Le polypropylène présente également des avantages environnementaux. Il est recyclable et peut être transformé en diverses applications après son utilisation initiale, contribuant ainsi à la réduction des déchets plastiques. De plus, il est relativement économe en énergie à toutes les étapes de sa production, ce qui en fait une option plus durable par rapport à d'autres matériaux.



Tableau 4 dimension de la membrane PP

Diamètre (D)	187mm
Épaisseur (e)	1,5875mm

Figure 37 : membrane circulaire découpée (PP)

Dans le cadre des essais expérimentaux, chaque membrane en PP utilisée présente une épaisseur uniforme de 1,58 mm et un diamètre de 18,7 cm. Les températures étudiées sont 100°C, 110°C, 120°C, 130°C et 140°C. Le capteur de position est positionné au-dessus du montage, alignant le rayon laser au centre de la membrane après un ajustement. Son objectif est d'enregistrer les hauteurs (selon z) au pôle de la membrane.

1.2.4 PVC (*chlorure de polyvinyle*)

Le PVC, ou chlorure de polyvinyle, est l'un des polymères les plus couramment utilisés dans le monde, offrant une variété d'applications allant de la construction à l'industrie médicale. Le PVC est un polymère synthétique dérivé du monomère de vinyle, composé de chaînes de molécules contenant du chlorure de vinyle. Ce polymère est largement apprécié pour ses propriétés uniques, notamment sa résistance à la corrosion, sa durabilité, sa facilité de transformation et son coût relativement faible. Il peut être fabriqué sous différentes formes, telles que rigide (PVC-U) ou souple (PVC-P), en fonction de la quantité de plastifiant ajoutée lors de la fabrication. L'une des principales utilisations du PVC est le secteur de la construction. Le PVC rigide est utilisé pour fabriquer des tuyaux, des raccords, des profilés et des systèmes de drainage en raison de sa résistance chimique, de sa durabilité et de sa facilité de manipulation. Les applications comprennent les systèmes de plomberie, les conduites d'eau potable, les systèmes d'égouts et les revêtements de toiture. Le PVC souple est utilisé pour les revêtements de sol, les revêtements muraux, les films plastiques pour fenêtres et les membranes d'étanchéité.

Dans le secteur médical, le PVC est utilisé pour la fabrication de dispositifs médicaux, tels que les tubes, les poches de sang, les gants et les cathéters. Sa biocompatibilité, sa résistance aux produits chimiques et sa facilité de stérilisation en font un matériau précieux pour garantir la sécurité des patients et la fonctionnalité des dispositifs médicaux. Cependant, il convient de noter que le PVC suscite également des préoccupations environnementales. Sa production nécessite l'utilisation de chlore, ce qui peut entraîner la formation de dioxines, des substances chimiques nocives. De plus, le PVC ne se décompose pas facilement et peut libérer des produits chimiques toxiques lorsqu'il est incinéré. Pour aborder ces préoccupations, des efforts ont été déployés pour améliorer les méthodes de production du PVC, promouvoir le recyclage et développer des alternatives plus respectueuses de l'environnement. En termes de durabilité, le PVC est soumis à des critiques en raison de son impact environnemental, notamment en ce qui concerne la gestion des déchets plastiques. Cependant, l'industrie du PVC a également fait des progrès dans la mise en œuvre de pratiques plus responsables. Le recyclage du PVC est de plus en

plus courant, avec des programmes de collecte et de traitement pour réutiliser le matériau dans de nouvelles applications.



Tableau 5 dimension de la membrane PVC

Diamètre (D)	187mm
Épaisseur (e)	1,5713mm

Figure 38 : membrane circulaire découpée (PVC)

Dans le cadre des essais expérimentaux, chaque membrane en PVC utilisée présente une épaisseur uniforme de 1,57 mm et un diamètre de 18,7 cm. Les températures étudiées sont 100°C, 110°C, 120°C, 130°C et 140°C. Le capteur de position est positionné au-dessus du montage, alignant le rayon laser au centre de la membrane après un ajustement. Son objectif est d'enregistrer les hauteurs (selon z) au pôle de la membrane.

1.3. Système d'acquisition de données

Pour le besoin de la modélisation, le logiciel de simulation numérique Matlab & Simulink est utilisé. La figure ci-dessous illustre le schéma du montage qui a été conçu pour enregistrer les valeurs de la hauteur verticale au pôle de la membrane z et les valeurs de temps t associées à chaque déplacement. Le montage a été élaboré spécifiquement pour cette tâche afin d'assurer une mesure précise et fiable de ces paramètres. Grâce à ce montage, il est possible de recueillir des données précises pour l'analyse des performances de la membrane et des systèmes connexes. Les résultats obtenus grâce à ce montage permettront de mieux comprendre les caractéristiques de la membrane et d'optimiser son fonctionnement. Le schéma du montage a été soigneusement élaboré pour minimiser les sources d'erreurs et assurer la fiabilité des résultats obtenus. La mesure précise de la hauteur

verticale et du temps est essentielle pour l'étude de la dynamique de la membrane. Le schéma du montage fournit un moyen efficace et fiable de réaliser cette mesure.

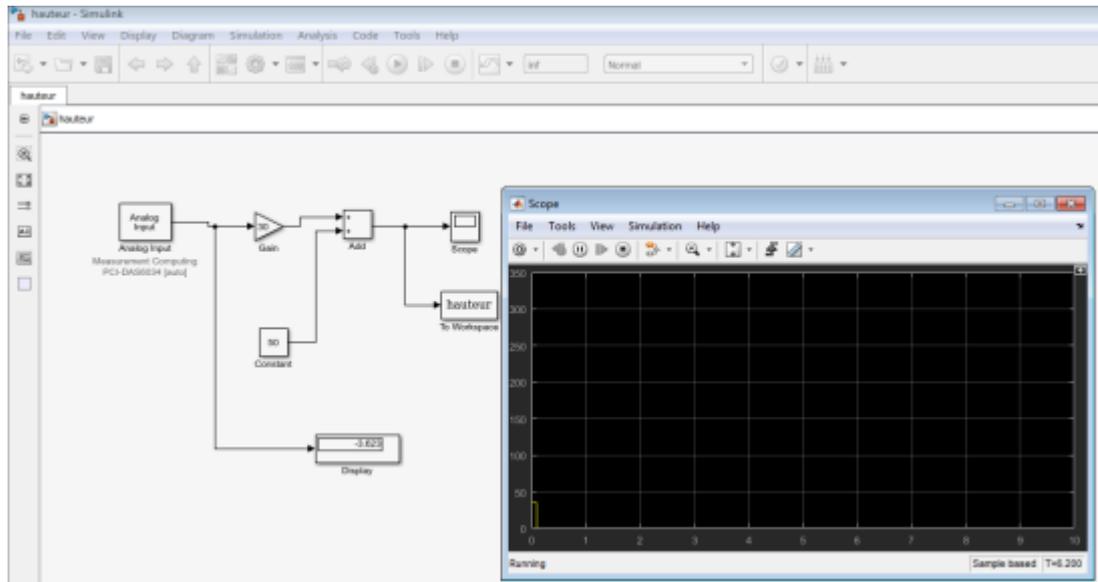


Figure 39 : Schéma représentatif du circuit d'acquisition de données

1.4. Déroulement expérimental

L'expérience est déroulée selon les étapes suivantes :

- Placer un capteur position afin qu'il puisse détecter la déformation de la membrane.
- Allumer le four et régler la bonne température.
- Stabiliser la température désirée et installer la membrane dans le four.
- Acquisition de données (déplacement, température et temps) par l'entremise du logiciel MATLAB.
- Vérifier la conformité des données pour l'analyse mathématique.
- Tracer les courbes de déformations vis-à-vis la température et le temps.
- Modéliser et identifier le comportement viscoélastique de chaque matériau

2. Montage expérimental

Le système expérimental associé à l'affaissement des membranes (ABS, HIPS, PP, PVC), sous l'effet de la température et de la gravité, doit répondre à plusieurs critères techniques comme la précision, la rapidité, la répétabilité et la sécurité des manipulations. Ici-bas la description sommaire des éléments associés au montage expérimental.

2.1. Chambre environnementale

La chambre environnementale utilisée est un four à convection (Figure 40) dont les dimensions sont les suivantes :

Tableau 6 dimension de la chambre environnementale

Longueur	Largeur	Hauteur
59,0 ± 0,1 cm	47,0 ± 0,1 cm	41,0 ± 0,1 cm



Figure 40 : Four à convection (chambre environnementale)

La chambre environnementale est chauffée à l'aide d'une résistance chauffante alimentée par un système électrique externe. Le transfert de chaleur par convection n'est pas instantané il faut donc attendre un certain temps avant que le four atteigne la température

désirée. A cet effet, un régulateur de température assure le contrôle de l'alimentation en courant électrique du four.

2.2 Module de fixation de la membrane

Le module en question est constitué de deux anneaux en aluminium amovibles, un inférieur et un supérieur, qui sont fixés sur des supports métalliques encastrés dans une plaque en acier. Cette plaque est disposée dans une chambre environnementale. Les dimensions de l'anneau inférieur sont présentées dans la Figure ci-dessous. Un joint d'étanchéité résistant à la haute température est placé entre la membrane et l'anneau supérieur (comme illustré dans la Figure suivante) pour assurer une étanchéité fiable et préserver la stabilité de la membrane. Ce module a été conçu pour résister aux conditions environnementales difficiles, tout en permettant la mesure précise des paramètres de la membrane. Grâce à ce dispositif, il est possible d'obtenir des données fiables pour une analyse approfondie de la performance de la membrane. Le montage est spécialement conçu pour minimiser les sources d'erreur et garantir des résultats précis. Sa conception soignée permet une manipulation aisée et une installation rapide.

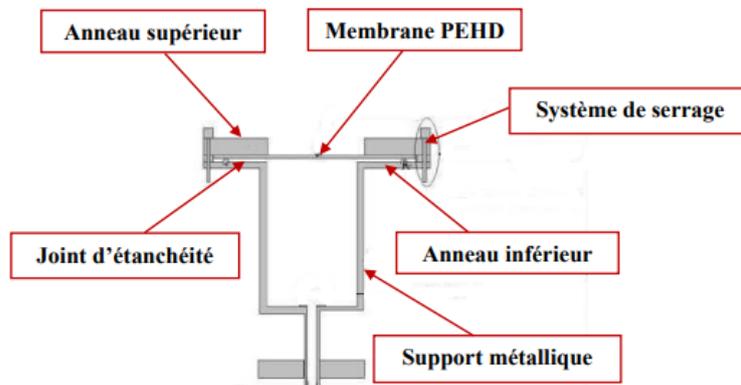


Figure 41 : dispositif de fixation pour membranes circulaire découpée

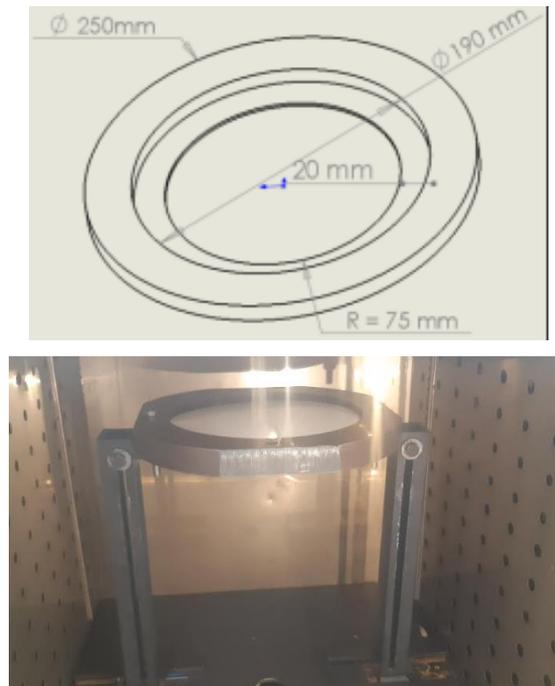


Figure 42 : Dimensionnement des deux anneaux pour fixer la membrane

2.3. Capteurs de mesure de la température

Dans la chambre environnementale, trois thermocouples sont disposés à deux endroits distincts. L'un de ces thermocouples transmet un signal électrique au régulateur de température. Ce dernier, en fonction du signal reçu, ajuste la température désirée en apportant des corrections si nécessaire. Un afficheur digital intégré au régulateur indique la valeur de la température mesurée. Grâce à cette configuration, il est possible de surveiller en temps réel la température de la chambre environnementale, d'assurer un contrôle précis de la température et de corriger rapidement les écarts par rapport à la consigne.



Figure 43 : Capteur de mesure de la température de la membrane

Cette approche permet d'obtenir des conditions de test reproductibles et fiables. Les thermocouples sont disposés de manière stratégique pour couvrir les zones les plus importantes de la chambre environnementale et garantir une mesure précise de la température. Enfin, la présence d'un afficheur digital facilite la lecture de la température mesurée et offre un suivi pratique et efficace de l'environnement de test.

2.4 Capteur de position (Laser)

Pour suivre l'évolution de la hauteur au pôle de la membrane thermoplastique, un capteur de position est installé. Ce type de capteur permet de mesurer la distance sans contact avec la cible, offrant ainsi une grande précision de mesure.

La mise en place de ce capteur permet de surveiller en temps réel la hauteur de la membrane et d'obtenir des données précises sur son comportement. La figure suivante présente le schéma du montage avec le capteur de position. Grâce à cette configuration, il est possible de suivre l'évolution de la hauteur avec une grande précision, offrant ainsi des données fiables pour l'analyse et la compréhension du comportement de la membrane.

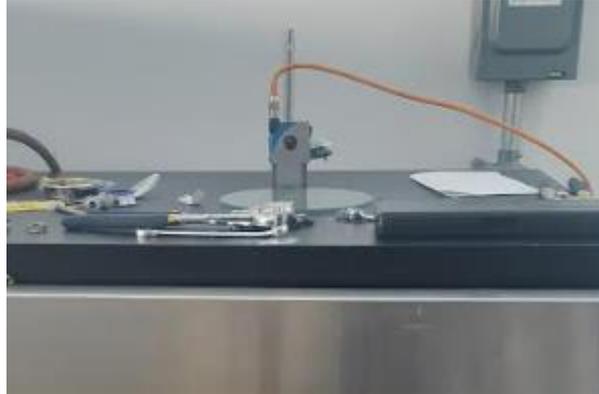


Figure 44 : Capteur de mesure de la position de la membrane

Avant d'entamer la phase de chauffage, il est impératif de régler la position centrale de la membrane en utilisant un capteur de position et un faisceau laser. Le capteur émet des signaux à travers une fente située au-dessus du four à combustion, lesquels sont réfléchis par la membrane. Pour faciliter la tâche, le capteur est fixé sur un dispositif de fixation qui a été usiné dans le laboratoire de l'UQAT. Grâce à ce dispositif, il est possible de tourner et de déplacer le capteur afin de pointer le faisceau laser au centre de la membrane. Cette étape est primordiale pour obtenir des mesures précises du déplacement du centre de la membrane pendant la phase de chauffage. En effet, cela permet d'assurer que le capteur suit l'évolution de la hauteur au pôle de la membrane thermoplastique. Ainsi, en ajustant la position centrale de la membrane, on peut obtenir des données plus fiables et précises pour les analyses ultérieures.

Voici les caractéristiques du capteur utilisé ; de référence CP35MHT80 :

- Plage de travail optique : 50...350 mm
- Plage de mesure optique : 300 mm
- Résolution optique : < 50 μm
- Linéarité optique : < 80 μm

- Type de lumière : laser rouge
- Longueur d'onde : 660 nm
- Durée de vie optique : 10000 h
- Tension d'alimentation électronique : 18...30 V DC
- Consommation électronique : < 80 mA
- Sortie analogique électronique : 0...10V \ 4...20 mA
- Température d'utilisation électronique : -25...70°C
- Mode de réglage mécanique : apprentissage
- Matériau du boîtier mécanique : plastique

Ces caractéristiques détaillent les performances du capteur en termes de précision et de fiabilité de la mesure. La plage de travail et la plage de mesure optiques indiquent les distances minimale et maximale dans lesquelles le capteur peut effectuer une mesure. La résolution optique et la linéarité optique déterminent la précision de la mesure. Le type de lumière et la longueur d'onde optiques sont des paramètres importants pour le choix du capteur en fonction de l'application. La durée de vie optique est un critère important pour la maintenance du capteur. Les caractéristiques électroniques, telles que la tension d'alimentation, la consommation et la sortie analogique, sont importantes pour l'intégration du capteur dans un système électronique. La température d'utilisation électronique est importante pour les applications qui nécessitent des mesures à des températures élevées ou basses. Le mode de réglage mécanique et le matériau du boîtier mécanique sont des critères à prendre en compte lors de l'installation et de l'utilisation du capteur.

2.5 Système d'acquisition des données

La communication entre les différents périphériques et l'ordinateur est assurée par une carte PCI présentée dans la figure suivante. Cette carte se caractérise par sa capacité à transmettre les données à haute vitesse et par le nombre de canaux qu'elle peut traiter simultanément. Elle joue un rôle crucial dans la collecte et le traitement des données. Les périphériques connectés à la carte PCI incluent notamment le capteur de position, les thermocouples,

l'afficheur numérique et le régulateur de température. Grâce à cette carte, les données sont acheminées efficacement vers l'ordinateur, où elles seront analysées et exploitées.

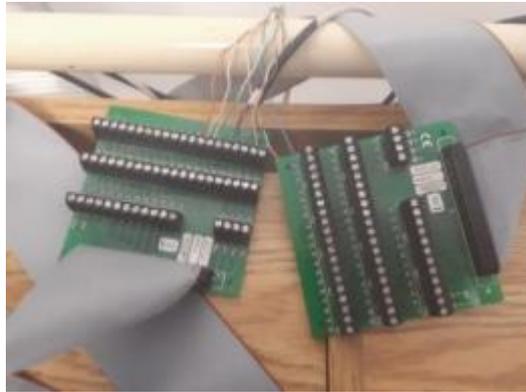


Figure 45 : Planche de circuit imprimé

3 Résultats expérimentaux

3.1 Introduction

Les membranes des matériaux utilisés pour l'étude (ABS, HIPS, PP, PVC) ont été procurés de l'entreprise G+ (Rouyn Noranda, Québec). Initialement, les matériaux se présentent sous forme de feuille en rouleau. Ensuite, à l'aide d'une machine de découpe CNC, les membranes sont produites sous formes circulaires minces. Les dimensions des membranes sont précisées dans la partie 1 du chapitre 3. La machine de découpe CNC utilise des commandes numériques pour découper les feuilles en formes prédéfinies. Elle permet également de créer des motifs ou des formes complexes avec une grande précision et répétabilité.

3.2 Manipulation et déroulement

Chacune des membranes de (ABS, HIPS, PP et PVC) utilisées lors des expériences à une épaisseur uniforme et un diamètre précisé dans le Tableau de la partie 1.2 du chapitre 3.

Pour l'étude expérimentale, cinq températures sont considérées : 100°C, 110°C, 120°C, 130°C et 140°C.

Le capteur de position est placé au-dessus du montage, de sorte que le rayon laser soit positionné au centre de la membrane. Un réglage est nécessaire pour assurer une position correcte. Le capteur enregistre la hauteur (selon z) au pôle de la membrane. L'utilisation de membranes uniformes permet de s'assurer que les résultats obtenus sont comparables et reproductibles. Les différentes températures testées permettent d'évaluer l'impact de la température sur les propriétés de la membrane, ce qui peut être utile pour optimiser les performances dans différentes applications.

Les étapes associées à l'expérimentation sont les suivantes :

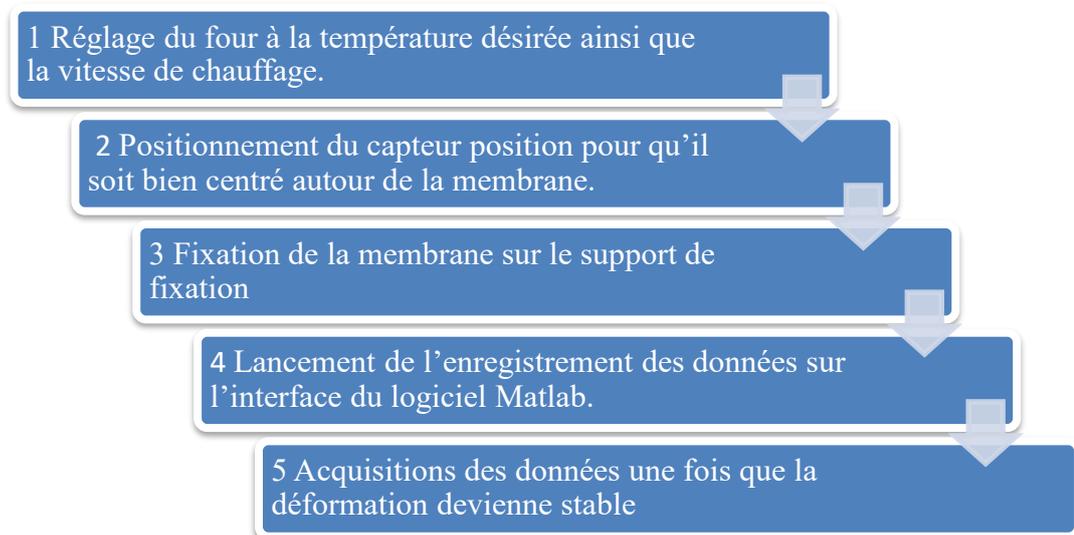


Figure 46 : démarche à suivre pour l'expérimentation

4 Résultats expérimentaux

Chaque matériau a été testé sous l'effet de 5 températures différentes (100, 110, 120, 130 et 140) déjà mentionnée. À cet effet, plusieurs échantillons ont été testés et seuls les résultats moyennes ont été retenus. Les résultats obtenus mettent en évidence la variation de la hauteur au pôle de la membrane (qui est déterminé à l'aide du capteur de position) en fonction du temps pour différentes températures. Ensuite, les résultats ont été utilisés pour l'identification du comportement viscoélastique des membrane étudié.

4.1 Comportement de l'ABS sous l'action de la température et la gravité

La figure 47 illustre l'effet de la température sur l'évolution de la hauteur de la membrane dans le temps. Cette figure mis en évidence l'effet de la température sur l'affaissement de la membrane en ABS. On constate que le début de la déformation de la membrane dépend également de la température. En effet, les températures les plus basses entraînent un retard dans le début de l'affaissement. Il est donc important de prendre en compte la température dans l'analyse des propriétés de la membrane. Cette remarque est très utile pour optimiser l'utilisation de la membrane dans diverses applications et à améliorer la compréhension de son comportement sous différentes conditions thermiques.

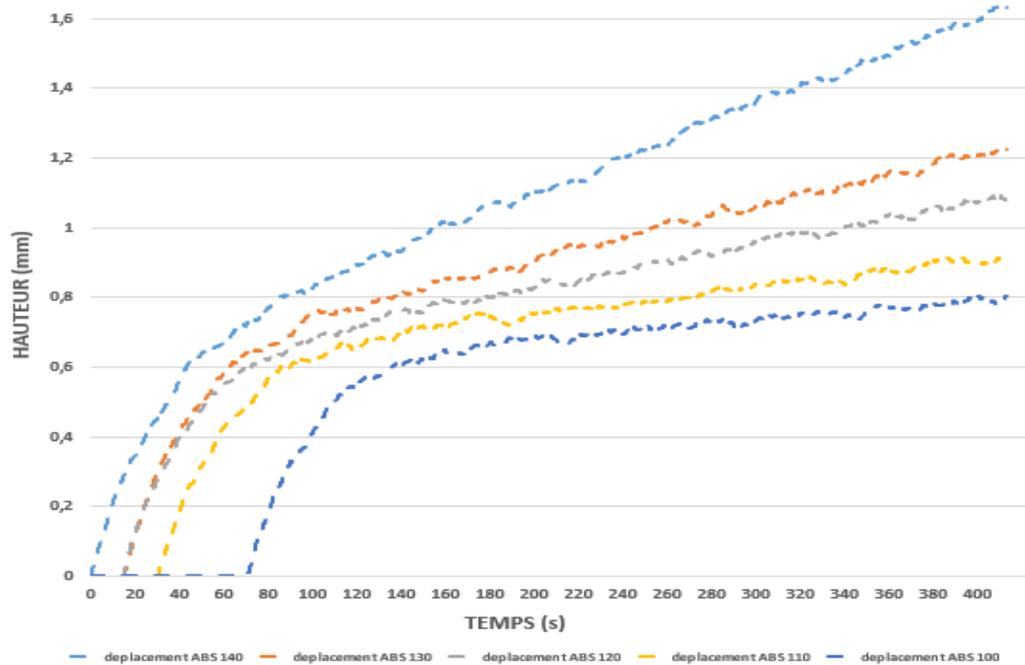


Figure 47 : Affaissement de la membrane (ABS) pour des températures différentes.

Sur la figure 48, on a présenté la hauteur maximale au pôle de la membrane pour les cinq températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C). On constate que la hauteur maximale à l'extrémité de la membrane augmente avec l'augmentation de la température. Cette tendance est plus significative avec les températures les plus élevées.

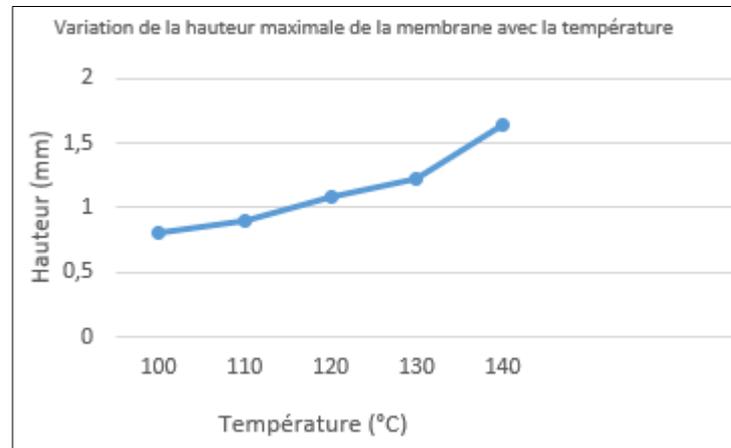


Figure 48 : Variation de la hauteur maximale de la membrane (ABS) avec la température

4.2 Comportement de l'HIPS sous l'action de la température et la gravité

Plusieurs tests ont été réalisés sur des membranes en HIPS pendant la partie expérimentale. Pour chaque température mentionnée, plusieurs échantillons ont été testés et seuls les résultats moyennes ont été retenus. Les courbes moyennes des variations de la hauteur en fonction du temps ont été tracées à partir de ces résultats, comme indiqué dans la Figure 49. Ces courbes seront, par la suite, utilisées pour identifier les paramètres viscoélastiques de la membrane.

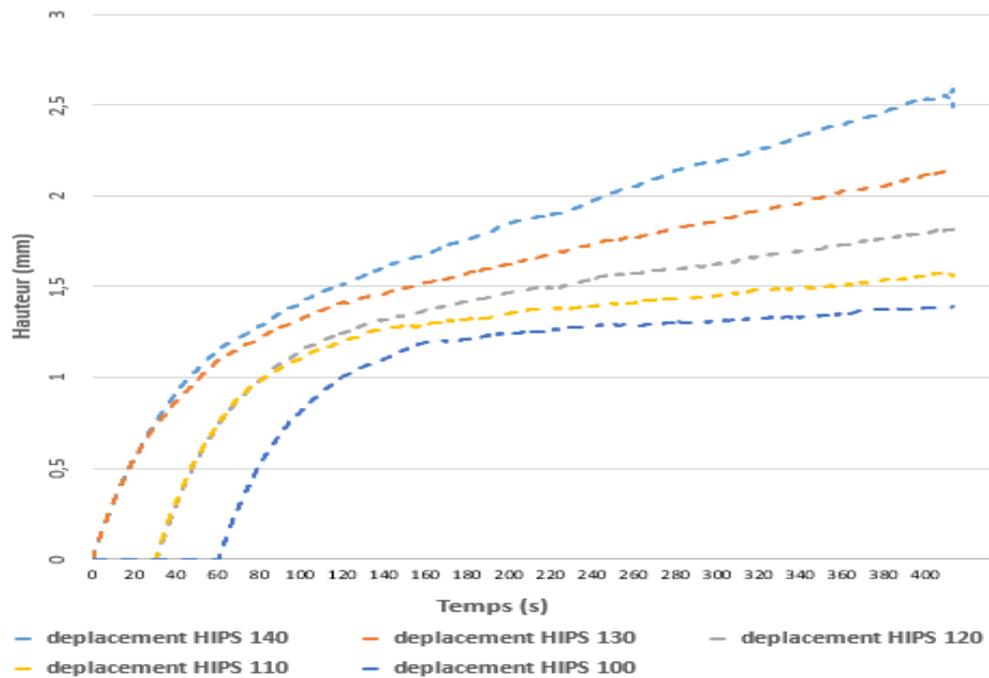


Figure 49 : Affaissement de la membrane (HIPS) pour des températures différentes.

Sur la figure 50, on a présenté la hauteur maximale au pôle de la membrane pour les cinq températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C). On constate que la hauteur maximale à l'extrémité de la membrane augmente avec l'augmentation de la température. Cette tendance est plus significative avec les températures les plus élevées.

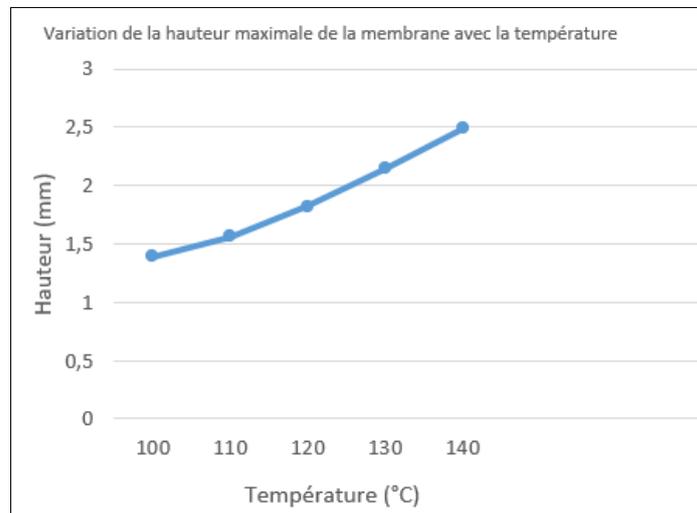


Figure 50 : Affaissement maximale de la membrane (HIPS) avec la température

4.3. Comportement de PP sous l'action de la température et la gravité

Comme précédemment (pour l'ABS et le HIPE), la figure 51 illustre l'effet de la température sur l'évolution de la hauteur de la membrane dans le temps. Cette figure mis en évidence l'effet de la température sur l'affaissement de la membrane en PP. On constate que le début de la déformation de la membrane dépend également de la température. En effet, les températures les plus basses entraînent un retard dans le début de l'affaissement. Il est donc important de prendre en compte la température dans l'analyse des propriétés de la membrane. Cette remarque est très utile pour optimiser l'utilisation de la membrane dans diverses applications et à améliorer la compréhension de son comportement sous différentes conditions thermiques.

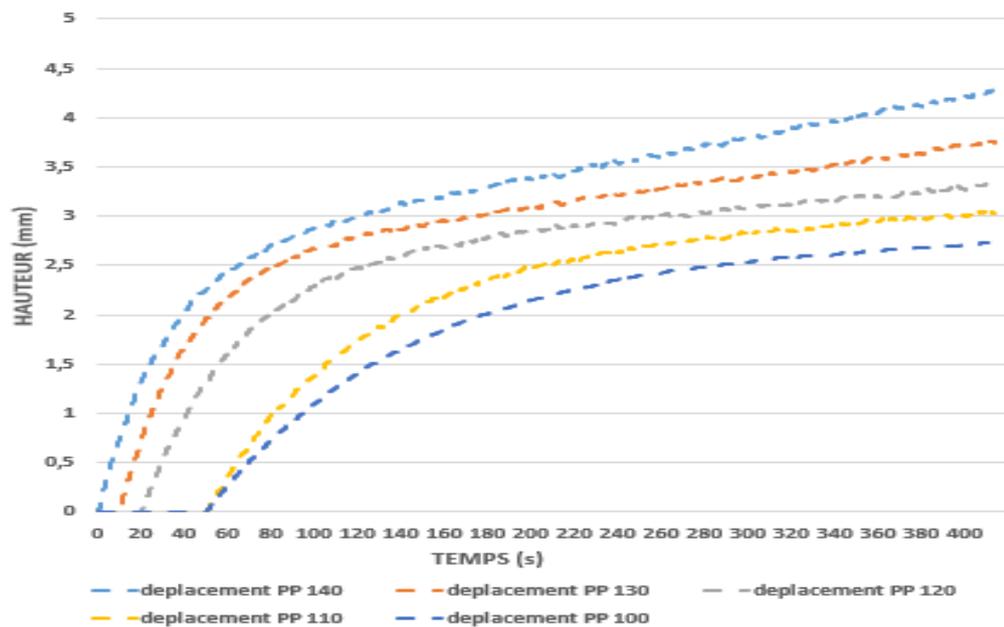


Figure 51 : Affaissement de la membrane (PP) pour des températures différentes.

Sur la figure 52 (relativement au PP), on a présenté la hauteur maximale au pôle de la membrane pour les cinq températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C). On constate que la hauteur maximale à l'extrémité de la membrane augmente avec l'augmentation de la température. Cette tendance est plus significative avec les températures les plus élevées.

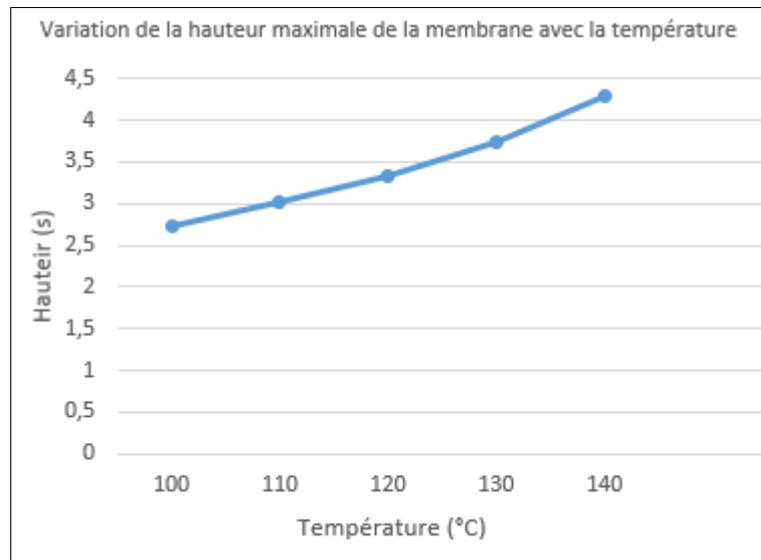


Figure 52 : Affaissement maximale de la membrane (PP) avec la température

4.4. Comportement de PVC sous l'action de la température et la gravité

Comme précédemment (pour l'ABS, le HIPE et le PP), la figure 53 illustre l'effet de la température sur l'évolution de la hauteur de la membrane dans le temps. Cette figure met en évidence l'effet de la température sur l'affaissement de la membrane en PVC. On constate que le début de la déformation de la membrane dépend également de la température. En effet, les températures les plus basses entraînent un retard dans le début de l'affaissement. Il est donc important de prendre en compte la température dans l'analyse des propriétés de la membrane. Cette remarque est très utile pour optimiser l'utilisation de la membrane dans diverses applications et à améliorer la compréhension de son comportement sous différentes conditions thermiques.

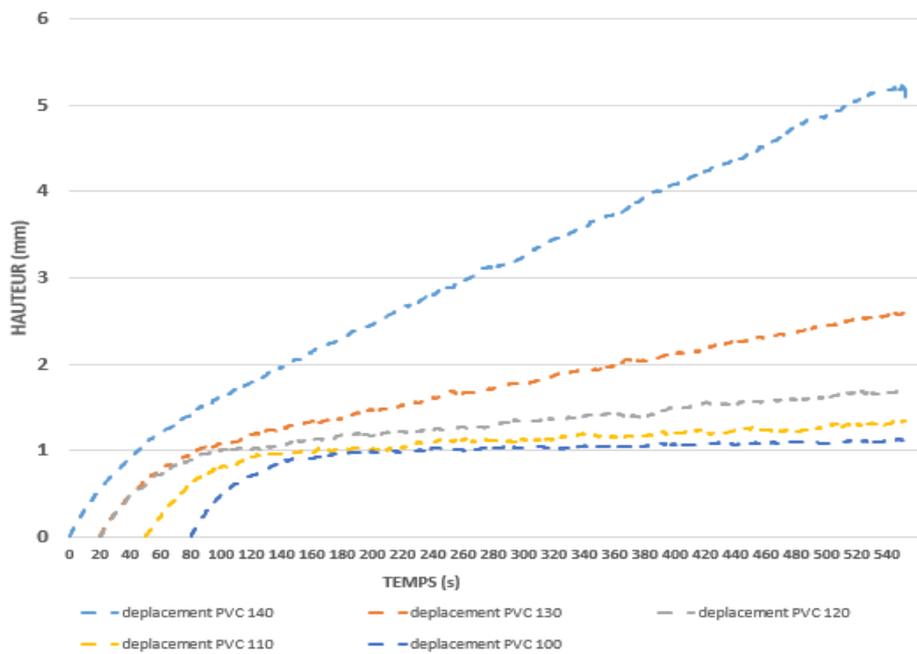


Figure 53 : Affaissement de la membrane (PVC) pour des températures différentes.

Sur la figure 54 (relativement au PVC), on a présenté la hauteur maximale au pôle de la membrane pour les cinq températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C). On constate que la hauteur maximale à l'extrémité de la membrane augmente avec l'augmentation de la température. Cette tendance est plus significative avec les températures les plus élevées.

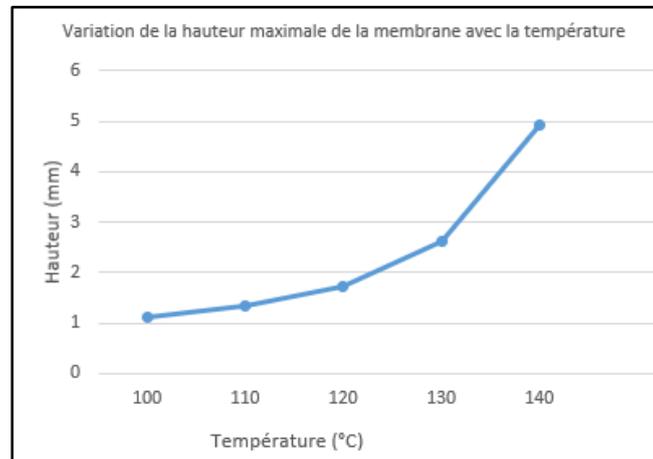


Figure 54 : Affaissement maximale de la membrane (PVC) avec la température

5. Discussion des résultats expérimentaux d'affaissements des membranes.

Selon les résultats expérimentaux obtenus, nous constatons que chaque matériau (ABS, HIPS, PP, PVC) montre des propriétés mécaniques propres relativement à l'effet combiné de la température et de la gravité. L'ABS, en particulier, se distingue par des courbes caractérisées par une résistance initiale élevée suivie d'une déformation progressive. Cette caractéristique montre sa capacité à maintenir une intégrité structurelle face à des contraintes élevées. Les courbes du HIPS, en revanche, suggèrent une réponse mécanique presque stable. Cette stabilité est avantageuse dans des applications nécessitant à la fois une réponse élastique immédiate et une capacité à s'adapter à des contraintes prolongées. Le PP présente des similitudes avec l'ABS, exhibant une résistance à la déformation qui révèle une aptitude à maintenir une stabilité face à la contrainte. L'analyse des courbes démontre que le PP peut également répondre de manière élastique tout en conservant une résistance structurelle. Enfin, le PVC se distingue par des courbes de déformation qui traduisent une sensibilité aux variations thermiques. Cette réaction spécifique du PVC le

rend particulièrement adapté à des applications où la température fluctue, mettant en évidence sa flexibilité et sa capacité à s'ajuster en fonction de l'environnement thermique.

En conclusion, l'analyse des courbes de réponse mécanique de ces différents polymères offre des informations précieuses sur leurs propriétés et leurs performances dans des conditions variées. Chaque matériau présente des avantages spécifiques en fonction des exigences de l'application, allant de la résistance structurelle à la flexibilité face à des contraintes changeantes.

CHAPITRE 4 : IDENTIFICATION VISCOÉLASTIQUE

1. Introduction

Le but de ce chapitre est d'appliquer les principes de la mécanique des milieux continus pour identifier les paramètres viscoélastiques de la famille des thermoplastique (ABS, HIPs, PP, PVC) ainsi que les lois thermiques qui les régissent. Pour cela, une approche hybride, qui combine des résultats expérimentaux, des résultats numériques et une méthode d'optimisation (basée sur la technique des moindres carrés à travers l'algorithme de Levenberg-Marquardt), est utilisée.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : nous discuterons d'abord du choix du modèle mathématique que nous allons utiliser pour la modélisation. Ensuite, nous présenterons et interpréterons les résultats obtenus pour chacun des modèles avant d'identifier les paramètres visqueux de nos thermoplastiques et d'étudier leur dépendance en fonction de la température.

L'ensemble des résultats obtenus ont été réalisés à l'aide de Matlab, par l'entremise de la fonction "Curve Fitting". Cet outil permet d'approximer les résultats numériques et expérimentaux en utilisant un modèle mathématique approprié. L'algorithme de Levenberg-Marquardt est utilisé pour minimiser l'erreur entre les données expérimentales (entrée) et les résultats numériques (sortie) du système.

Après avoir choisi les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt, nous avons procédé à une simulation numérique pour obtenir des données de déformation pour différentes températures. Ensuite, des tests expérimentaux ont été effectués pour obtenir des données de déformation réelles. Les données expérimentales ont été ensuite comparées aux résultats numériques pour évaluer la performance des modèles choisis. Les résultats ont montré que les deux modèles ont donné des prédictions précises pour les données de déformation, mais que le modèle de Kelvin-Voigt était légèrement plus précis. Ainsi, au lieu d'utiliser le modèle de Kelvin-Voigt, nous avons choisi d'utiliser un modèle de comportement de type Burger modifié pour modéliser l'affaissement de nos membranes en PEHD. Ce choix a été motivé par l'allure des courbes expérimentales de la variation de la hauteur en fonction du

temps, tel que présenté dans le chapitre 3. Toutefois, il est opportun de souligner que le modèle de Burger modifié est une extension du modèle de Kelvin-Voigt, qui prend en compte les effets de la viscoélasticité non linéaire du matériau. Dans ce modèle, le matériau est considéré comme un système à deux éléments en parallèle : un élément élastique et un élément visqueux. L'élément visqueux est décrit par une loi de comportement non linéaire, qui prend en compte la dépendance de la viscosité en fonction de la contrainte appliquée. Cette dépendance peut être modélisée par une fonction de puissance, qui permet de représenter l'effet du vieillissement ou de la fatigue du matériau. La formule suivante permet d'exprimer la déformation en fonction des paramètres visqueux du matériau pour ce modèle :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta_1} t_1\right) \right) + \frac{\sigma}{\eta_2} t_1 \quad (\text{Equation 25})$$

Où :

- ⇒ σ : Contrainte appliquée (Pa)
- ⇒ E : Module de rigidité du matériau (Pa)
- ⇒ η_1 : Viscosité de fluage du matériau (Pa.s)
- ⇒ η_2 : Viscosité de relaxation du matériau (Pa.s)
- ⇒ t_1 : Durée de la déformation (s)

La contrainte (σ) dans la membrane résultant de la force de gravité est simplement le quotient de cette force par le poids de la membrane, exprimé par l'Equation suivante :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{m \times g}{\pi \times R^2} : \quad (\text{Equation 26})$$

Où :

- ⇒ F : Force (N)
- ⇒ S : Surface de la membrane (m²)
- ⇒ m : Masse de la membrane (Kg)
- ⇒ g : Accélération de la pesanteur (m.s⁻²)

⇒ R : Rayon de la membrane (m)

La table ci-dessous donne les valeurs des masses et des contraintes induites dans chaque membrane :

Tableau 7 Paramètre de calcul de contrainte pour chaque matériau

<i>Matériau</i>	<i>Masse (Kg)</i>	<i>G (m.s-2)</i>	<i>R (mm)</i>	<i>Contrainte (σ)</i>
ABS	0,025476835	9,81	93,5	9,1
HIPS	0,038355236	9,81	93,5	13,7
PP	0,029956279	9,81	93,5	10,7
PVC	0,035275618	9,81	93,5	12,6

La formule 26 a été utilisée pour modéliser l'affaissement des membranes en ABS, HIPS, PP et PVC en utilisant les conditions de température, de contrainte et de temps de déformation discutées dans la partie expérimentale. La contrainte induite dans la membrane par la force de gravité peut être exprimée par l'Equation de déformation déduite du model de Burger modifié, qui représente le rapport de cette force au poids de la membrane.

1.1 Modèle modifié de Burgers à trois paramètres pour l'ABS

Les figures (55-59) fournies une comparaison détaillée de l'évolution des déformations expérimentales de l'ABS à différentes températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C) en référence au modèle de burger modifié. L'analyse de ces graphiques permet de confirmer que le modèle de Burger modifié choisi représente une excellente corrélation avec les réponses expérimentales de l'ABS.

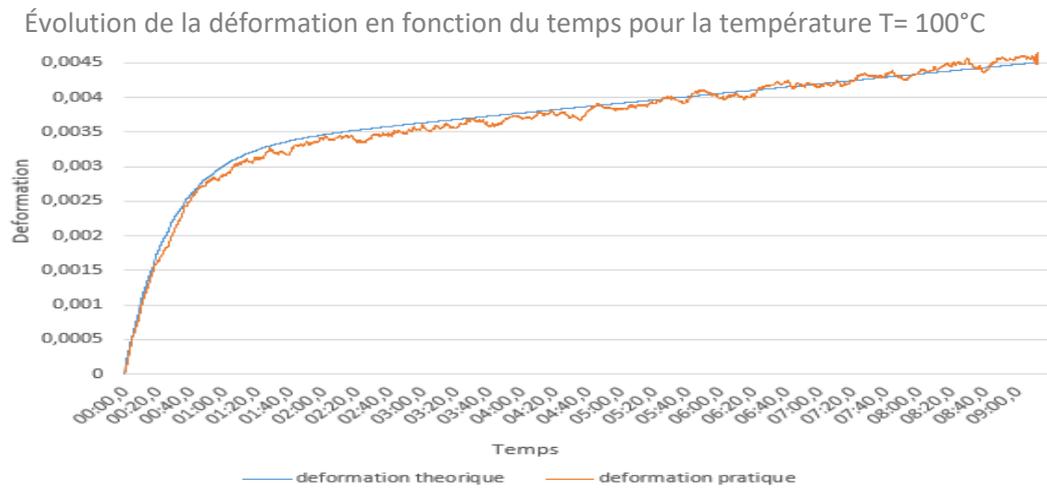


Figure 55 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température $T100^{\circ}\text{C}$

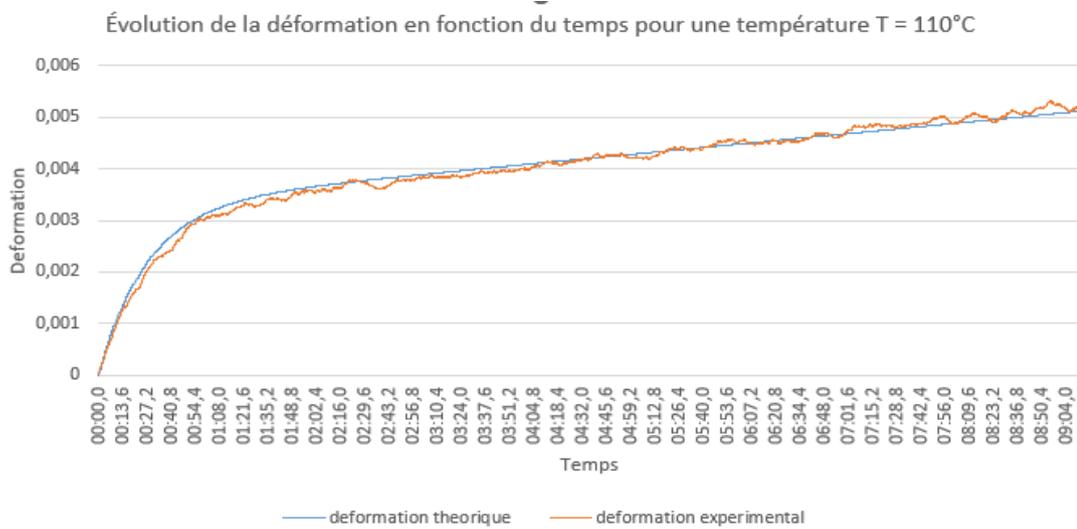


Figure 56 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température $T = 110^{\circ}\text{C}$

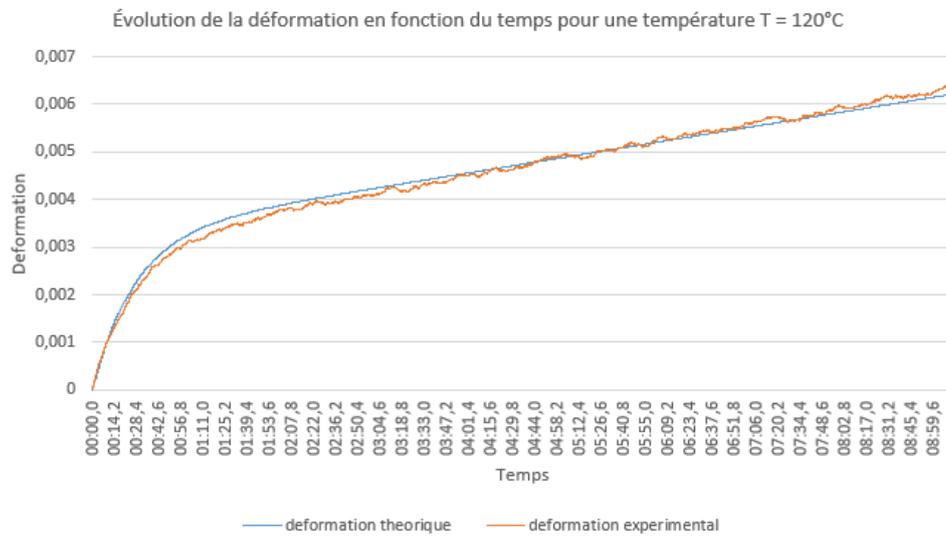


Figure 57 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température $T = 120^{\circ}\text{C}$

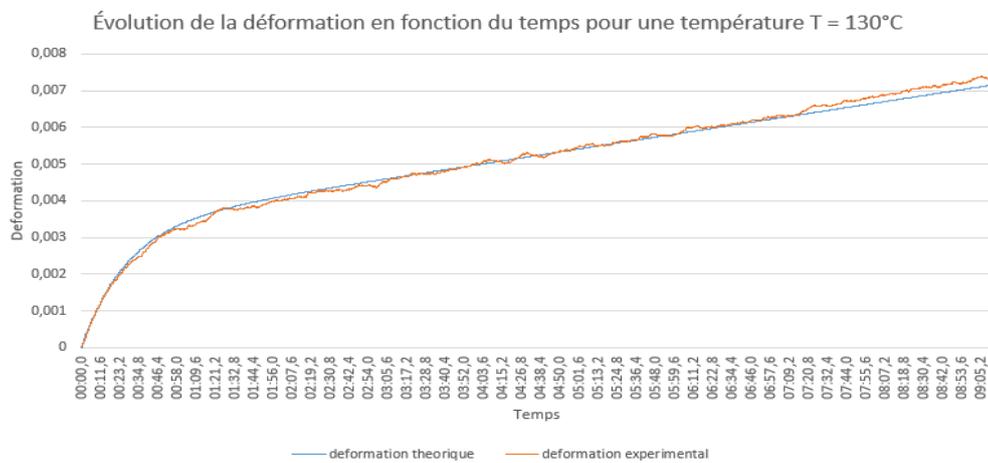


Figure 58 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température $T = 130^{\circ}\text{C}$

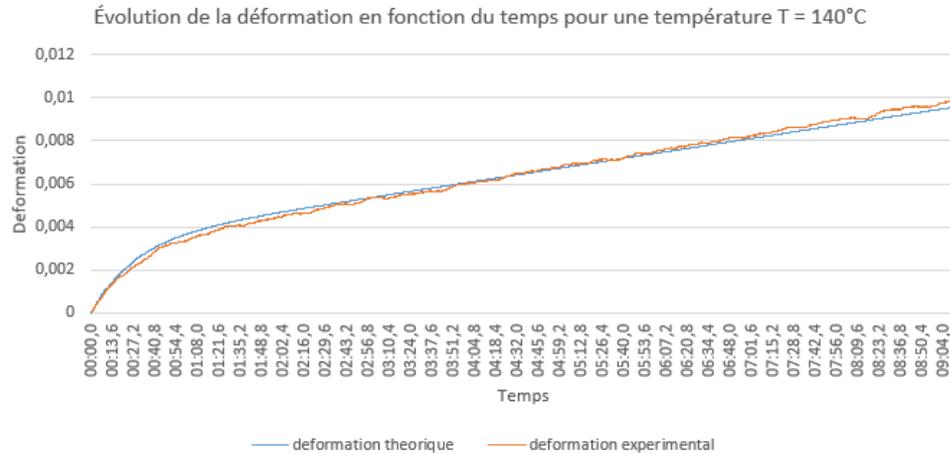


Figure 59 : Déformation de l'ABS en fonction du temps pour une température T = 140°C

Les coefficients de détermination R^2 sont proches de l'unité, ce qui indique une excellente corrélation entre les données expérimentales et le modèle. L'ajout d'un amortisseur en série au modèle a également été efficace, avec la partie visqueuse du nouveau modèle suivant très bien la forme de la courbe expérimentale. En conséquence, il on peut conclure que le modèle modifié de Burgers à trois paramètres convient pour modéliser l'affaissement de membranes circulaires en ABS sous l'effet de la température et de la gravité.

Les trois paramètres identifiés du modèle modifié de Burgers (viscosité η_1 , η_2 et rigidité E) en fonction de la température ont été présentés dans le Tableau 8, relativement aux essais expérimentaux.

Tableau 8 *Évolution de la rigidité et des viscosités. Relative au modèle de Berger modifié, de l'ABS en fonction de la température, comme décrite par le modèle à trois paramètres visqueux*

Température (°C)	E (MPa)	η_1 (Pa.s)	η_2 (Pa.s)
100	2830	7266	385531
110	2781	7297	260831
120	2766	7310	169663
130	2748	7309	130164
140	2715	7326	80445

Le Tableau suivant présente les résultats d'identification de la viscosité totale (η) du matériau pour chaque température :

Tableau 9 *Valeurs numériques de E et η obtenus par modélisation pour l'ABS*

Température (°C)	E (MPa)	η (Pa. s)	Coefficient de détermination R ²
100	2830	388640	0,992
110	2781	262934	0,992
120	2766	170687	0,994
130	2748	130687	0,996
140	2715	80687	0,997

La viscosité déterminée par le modèle à trois paramètres visqueux diminue considérablement avec la température, comme on peut le voir dans la figure suivante. Ce résultat était attendu et il reste à trouver la loi qui régit ce comportement vis-à-vis de la température.

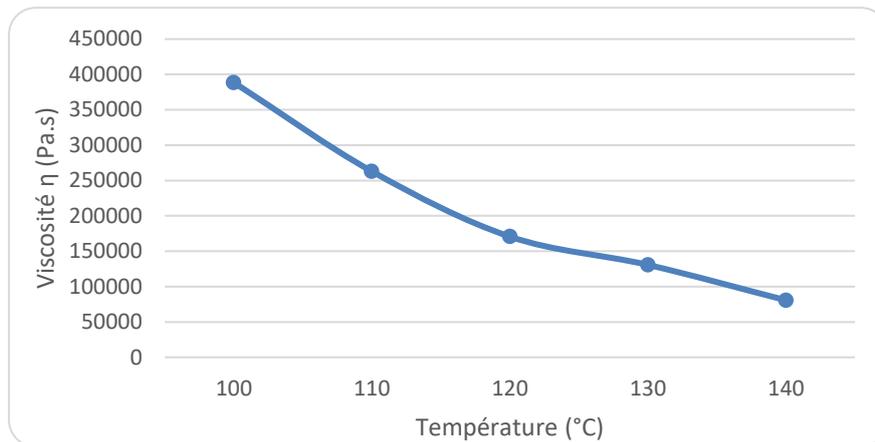


Figure 59 : Variation de la viscosité de l'ABS en fonction de la température (modèle de Burger modifié)

La Figure suivante montre que la rigidité des membranes diminue progressivement de manière presque linéaire avec l'augmentation de la température. Cependant, cette diminution est légère.

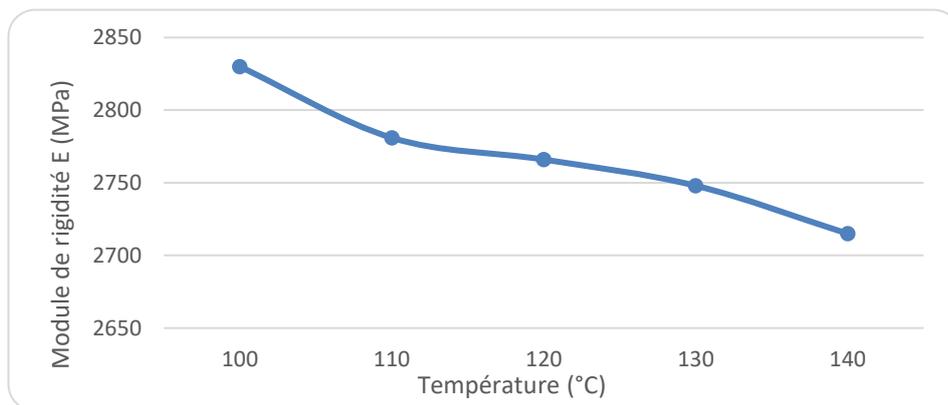


Figure 60 : Variation du module de rigidité de l'ABS en fonction de la température (modèle de Burger modifié)

1.2 Modèle modifié de Burgers à trois paramètres pour le HIPS

Les figures (61-65) fournies une comparaison détaillée de l'évolution des déformations expérimentales de l'HIPS à différentes températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C) en référence au modèle de burger modifié. L'analyse de ces graphiques permet de confirmer que le modèle de Burger modifié choisi représente une excellente corrélation avec les réponses expérimentales de l'HIPS.

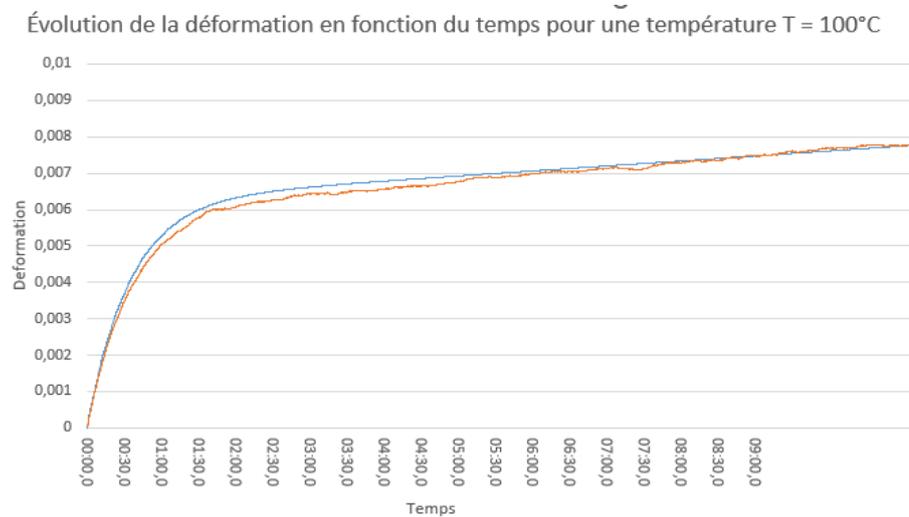


Figure 61 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température $T = 100^{\circ}\text{C}$

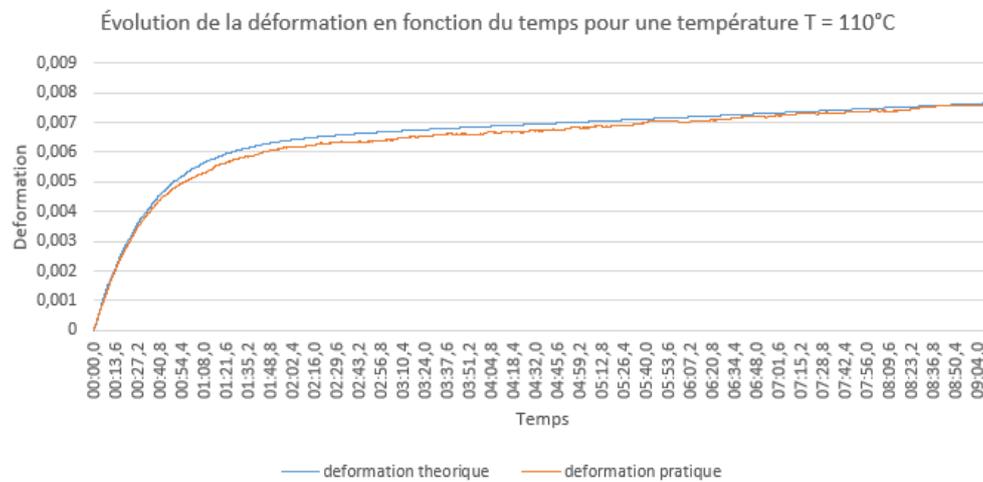


Figure 62 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 110°C

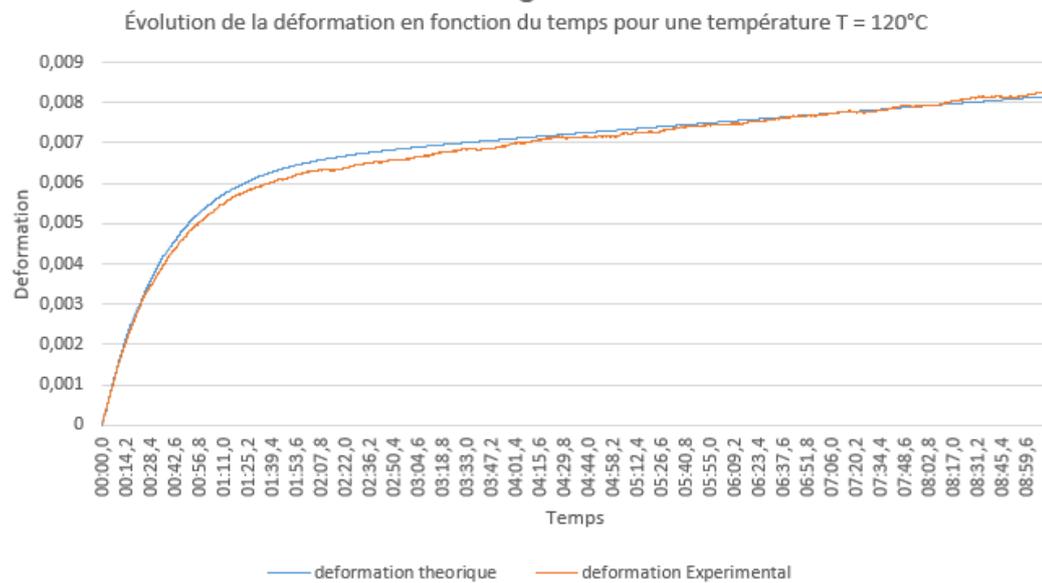


Figure 63 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 120°C

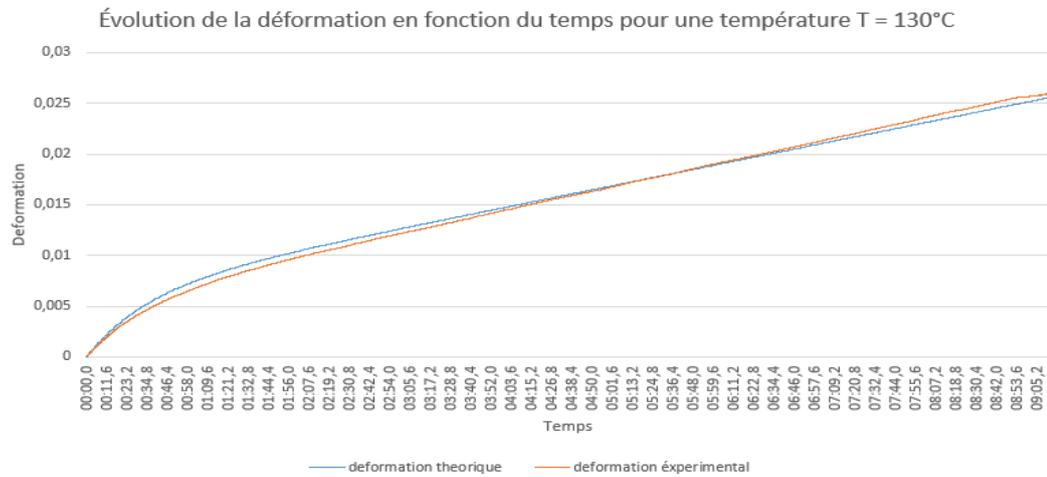


Figure 64 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 130°C

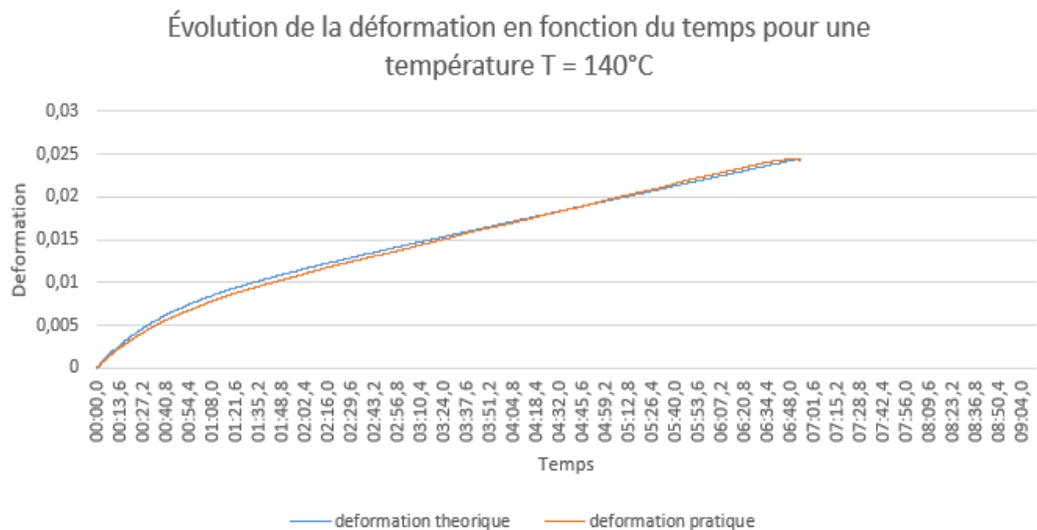


Figure 65 : Déformation du HIPS en fonction du temps pour une température T = 130°C

Les coefficients de détermination R^2 sont proches de l'unité, ce qui indique une excellente corrélation entre les données expérimentales et le modèle. L'ajout d'un amortisseur en série

au modèle a également été efficace, avec la partie visqueuse du nouveau modèle suivant très bien la forme de la courbe expérimentale. En conséquence, il on peut conclure que le modèle modifié de Burgers à trois paramètres convient pour modéliser l'affaissement de membranes circulaires en ABS sous l'effet de la température et de la gravité.

Les trois paramètres identifiés du modèle modifié de Burgers (viscosité η_1 , η_2 et rigidité E) en fonction de la température ont été présentés dans le Tableau 8, relativement aux essais expérimentaux.

Tableau 10 *Évolution de la rigidité et de la viscosité, relative au modèle de Berger modifié, de l'HIPS en fonction de la température, comme décrite par le modèle à trois paramètres visqueux*

Température (°C)	E (MPa)	η_1 (Pa.s)	η_2 (Pa.s)
100	2196,4	7573	596705
110	2190,2	7196	338980
120	2169,4	7573	223851
130	2137,2	7573	131418
140	2115,2	7573	89910

Le Tableau suivant présente les résultats d'identification de la viscosité totale (η) du matériau pour chaque température :

Tableau 11 Valeurs numériques de E et η obtenus par modélisation pour l'HIPS

Température (°C)	E (MPa)	η (Pa. s)	Coefficient de détermination R^2
100	2830	598500	0,997
110	2781	340000	0,997
120	2766	224300	0,998
130	2748	131550	0,999
140	2715	90000	0,999

La figure suivante montre que la viscosité déterminée par le modèle à trois paramètres visqueux diminue considérablement avec l'augmentation de la température.

Cette observation était attendue, mais il reste à trouver la loi qui régit ce comportement. Cette diminution de la viscosité peut être due à une augmentation de la mobilité moléculaire avec la température, qui réduit la résistance au cisaillement du matériau.

Cependant, la relation entre la viscosité et la température peut être complexe et dépendre de nombreux facteurs, tels que la structure moléculaire, la densité, la pression et la composition du matériau. Il est donc important de continuer à étudier les propriétés viscoélastiques des matériaux à différentes températures afin de mieux comprendre leur comportement et de développer des modèles plus précis. Ces résultats peuvent avoir des implications importantes pour l'ingénierie des matériaux et la conception de produits, en particulier pour les applications où la température est un facteur critique, tels que l'aérospatiale, l'automobile et l'électronique.

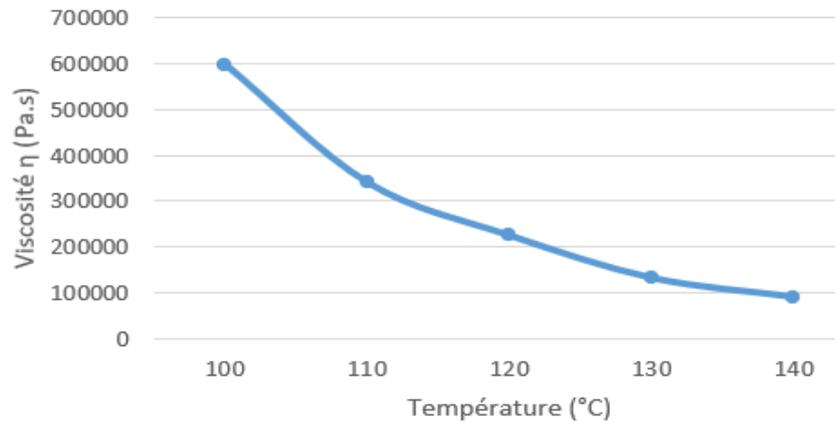


Figure 65 : Variation de la viscosité de l'HIPS en fonction de la température (modèle de Burger modifié)

La rigidité des membranes diminue presque linéairement avec l'augmentation de la température, comme le montre la Figure. Cependant, cette diminution est légère.

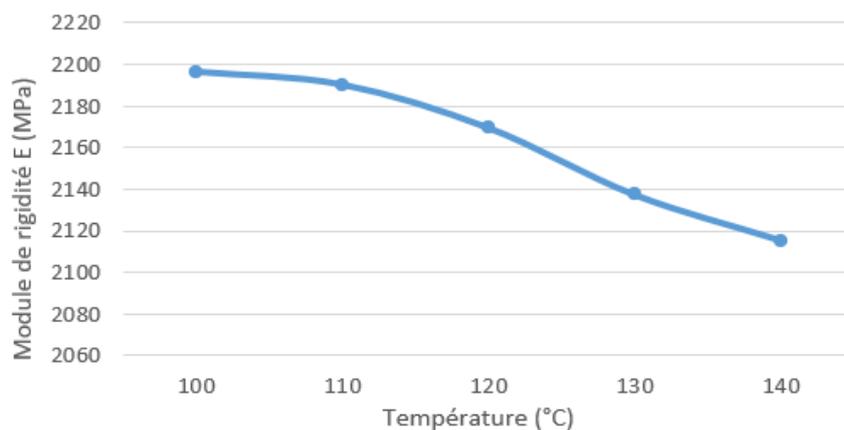


Figure 66 : Variation du module de rigidité de l'HIPS en fonction de la température (modèle de Burger modifié)

1.3 Modèle modifié de Burgers à trois paramètres pour le PP

Les figures (67-71) fournies une comparaison détaillée de l'évolution des déformations expérimentales de PP à différentes températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C) en référence au modèle de burger modifié. L'analyse de ces graphiques permet de confirmer que le modèle de Burger modifié choisi représente une excellente corrélation avec les réponses expérimentales de PP.

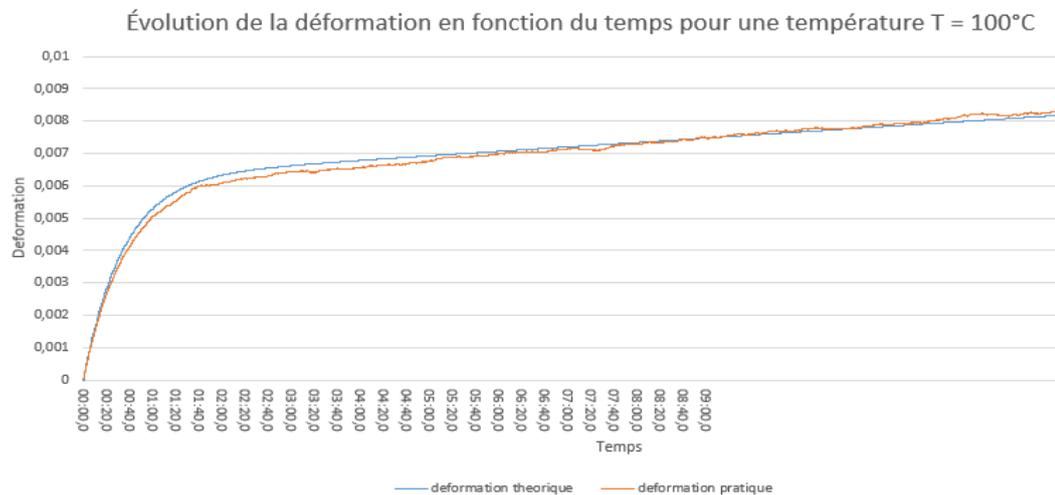


Figure 67 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 100°C

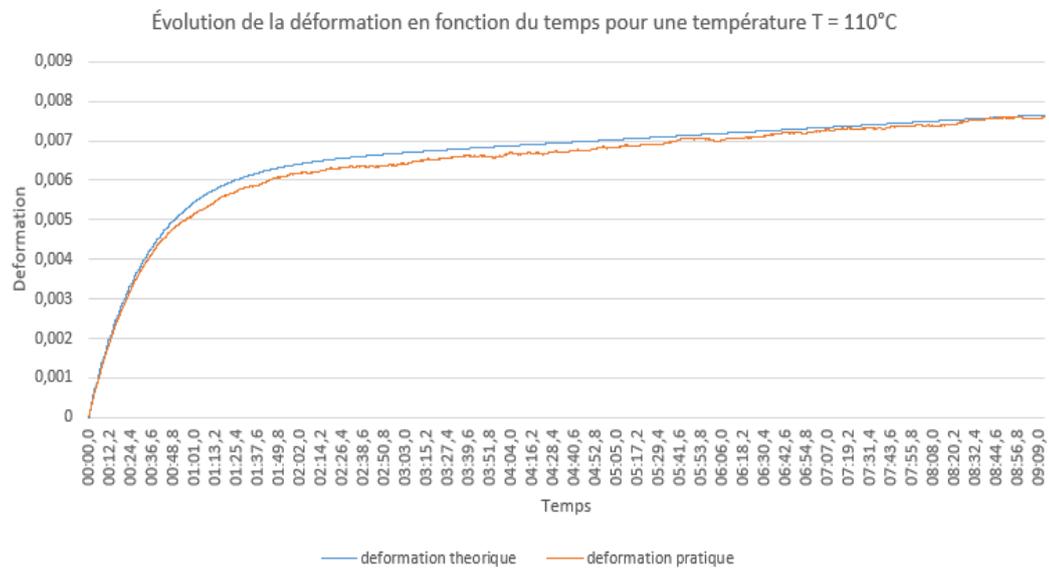


Figure 68 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 110°C

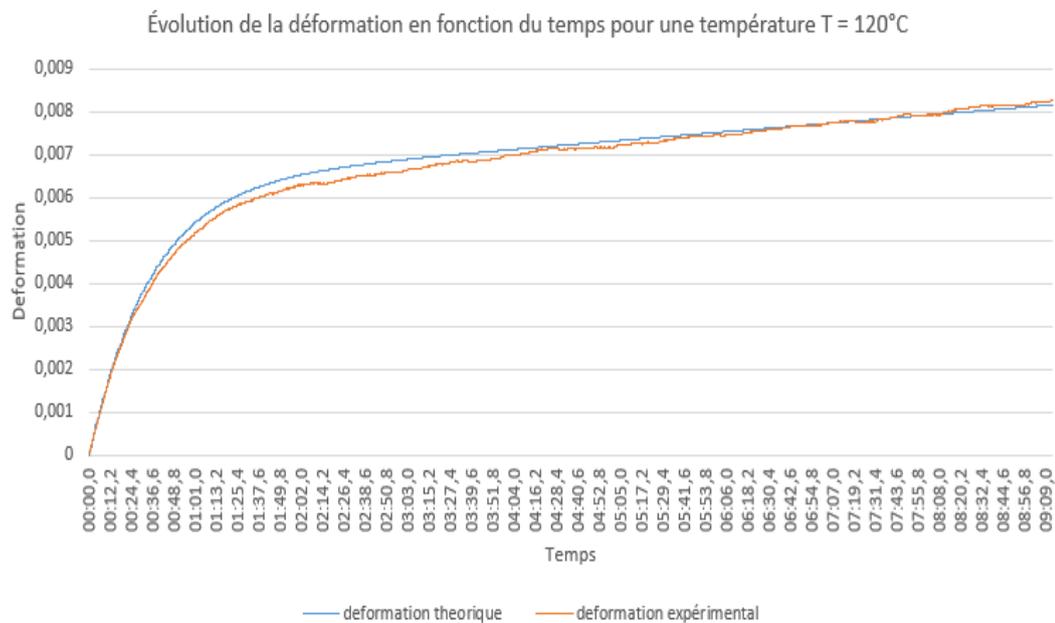


Figure 69 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 120°C

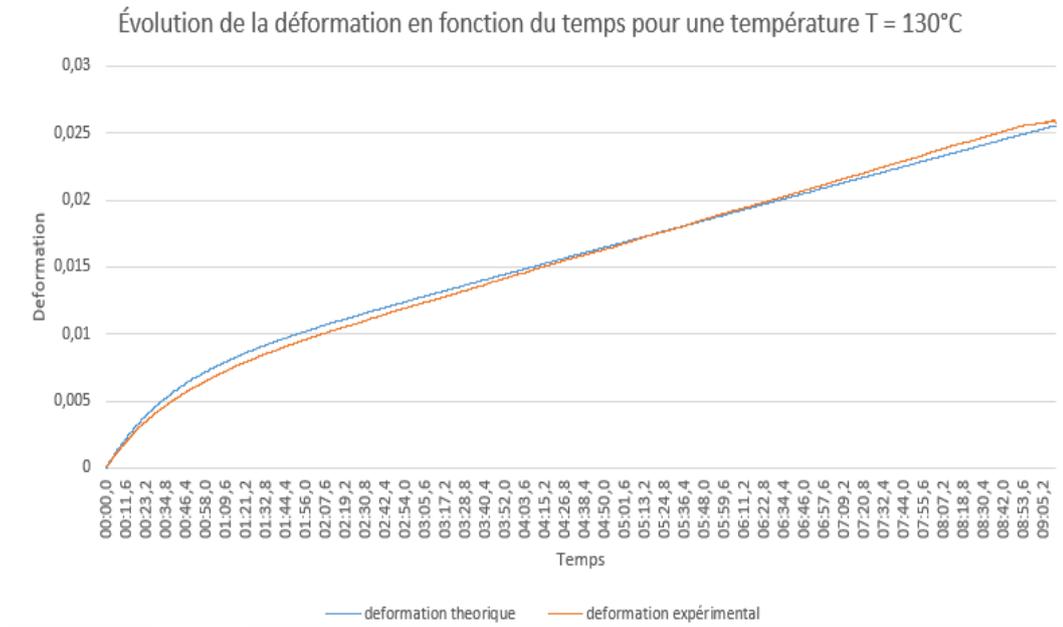


Figure 70 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 130°C

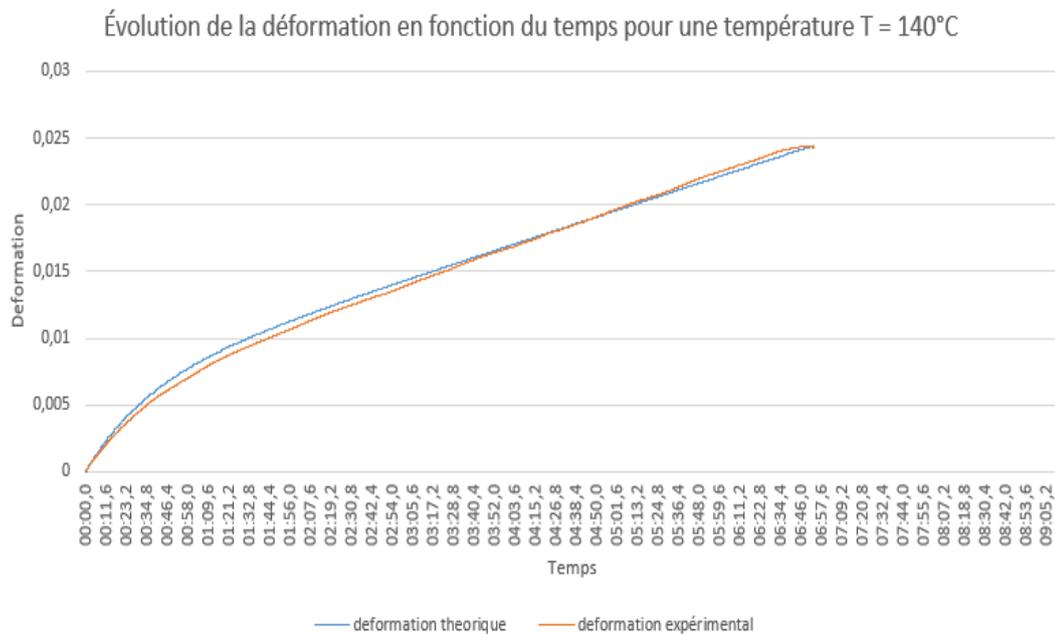


Figure 71 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 140°C

Après avoir examiné les graphiques, il est évident que les courbes produites par le modèle à trois paramètres visqueux correspondent bien aux courbes de déformation expérimentales, quelles que soient les températures testées. Les coefficients de détermination R^2 sont élevés, ce qui indique une forte corrélation entre les données expérimentales et le modèle.

L'ajout d'un amortisseur en série au modèle s'est également avéré efficace, car la partie visqueuse du nouveau modèle suit très bien la forme de la courbe expérimentale. En conséquence, on peut conclure que le modèle modifié de Burgers à trois paramètres est parfaitement adapté pour modéliser l'affaissement de membranes circulaires en PP sous l'influence de la température et de la gravité.

Les trois paramètres identifiés du modèle modifié de Burgers (viscosité η_1 , η_2 et rigidité E) en fonction de la température ont été présentés dans le tableau suivant, en se basant sur nos essais expérimentaux.

En somme, les résultats indiquent que le modèle à trois paramètres visqueux est une méthode fiable pour prédire les déformations des membranes circulaires en PP sous différentes conditions de température et de gravité. L'ajout de l'amortisseur en série améliore la précision du modèle, ce qui suggère que ce modèle pourrait être utilisé dans diverses applications industrielles. Les résultats présentés dans le tableau fournissent également des informations importantes pour la conception et l'optimisation de ces membranes dans diverses applications industrielles.

Tableau 12 Évolution de la rigidité et de la viscosité de l'PP en fonction de la température, comme décrite par le modèle à trois paramètres

Température (°C)	E (MPa)	η_1 (Pa.s)	η_2 (Pa.s)
100	1490,658	5442	313823
110	1485,612	5638	170686
120	1476,738	5648	110978
130	1459,338	5245	73227
140	1435,326	5539	54146

Le Tableau suivant présente les résultats d'identification de la viscosité totale (η) du matériau pour chaque température :

Tableau 13 Valeurs numériques de E et η obtenus par modélisation pour le PP

Température (°C)	E (MPa)	η (Pa. s)	Coefficient de détermination R^2
100	1490,658	315400	0,995
110	1485,612	171200	0,997
120	1476,738	111200	0,998
130	1459,338	73300	0,999
140	1435,326	54200	0,999

La figure ci-dessous montre une diminution de la viscosité déterminée par le modèle à trois paramètres visqueux avec l'augmentation de la température, ce qui était attendu. Toutefois, la loi qui régit ce comportement reste à déterminer. Cette diminution de la viscosité pourrait s'expliquer par une augmentation de la mobilité moléculaire avec la température, ce qui réduirait la résistance au cisaillement du matériau.

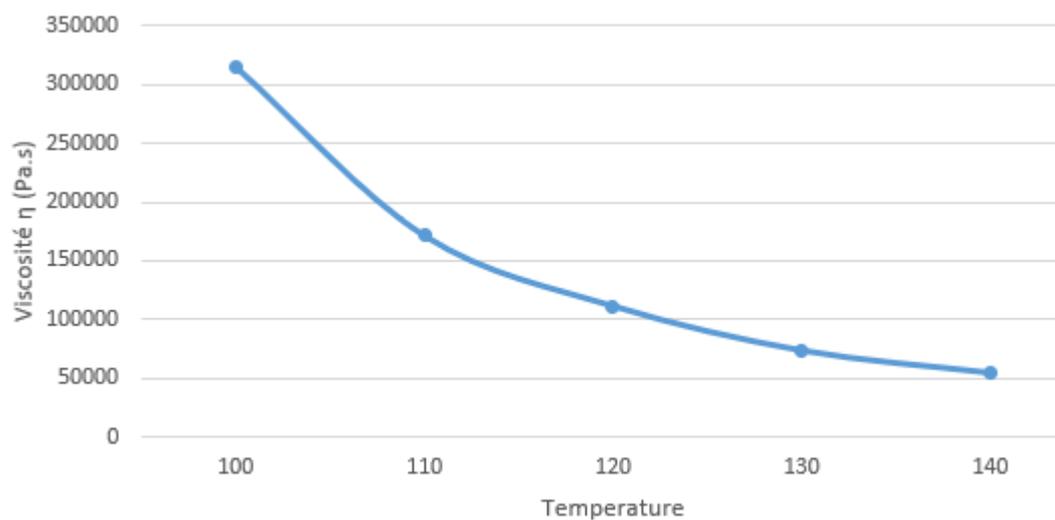


Figure 72 : Variation de la viscosité de l'PP en fonction de la température (modèle de Burger modifié)

Comme illustré dans la Figure, la rigidité des membranes diminue avec l'augmentation de la température.

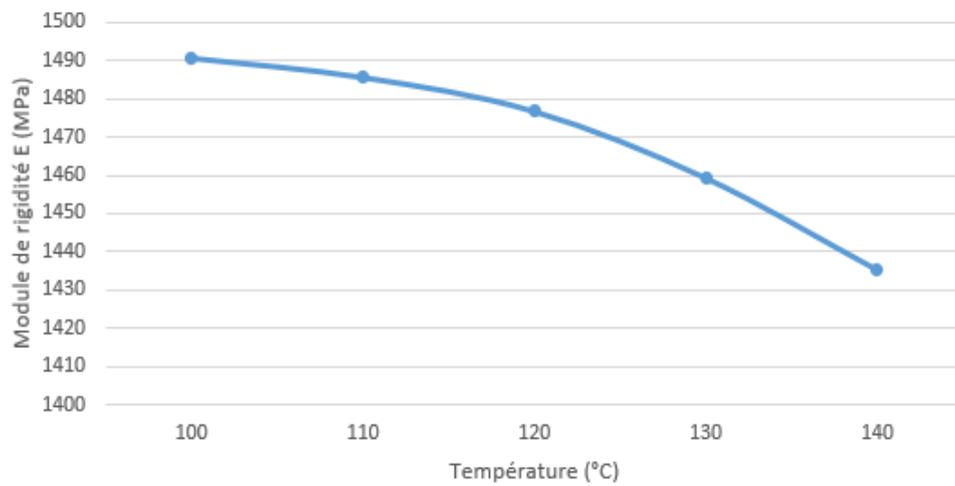


Figure 73 : Variation du module de rigidité de l'PP en fonction de la température (modèle de Burger modifié)

1.4 Modèle modifié de Burgers à trois paramètres pour le PVC

Les figures (74-78) fournies une comparaison détaillée de l'évolution des déformations expérimentales de PVC à différentes températures (100, 110, 120, 130 et 140 °C) en référence au modèle de burger modifié. L'analyse de ces graphiques permet de confirmer que le modèle de Burger modifié choisi représente une excellente corrélation avec les réponses expérimentales de PVC.

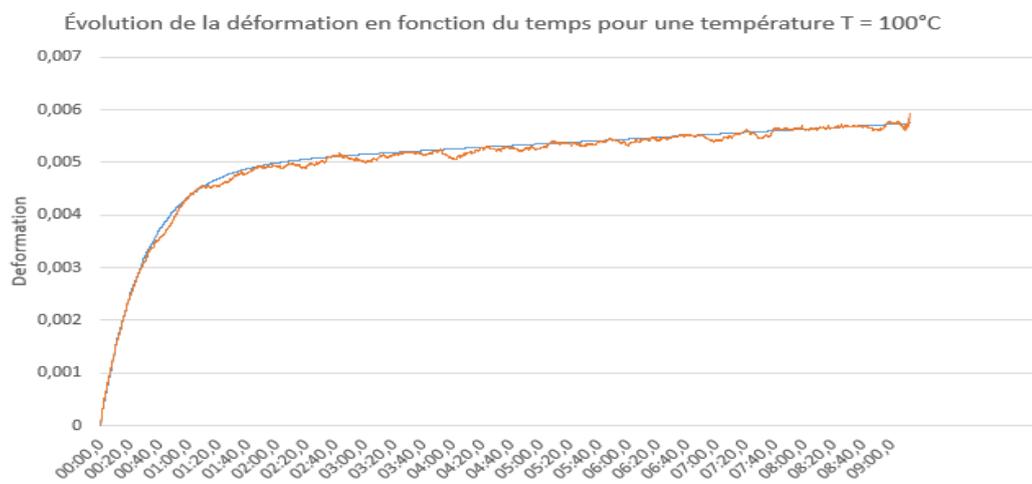


Figure 74 : Déformation du PVC en fonction du temps pour une température $T = 100^{\circ}\text{C}$

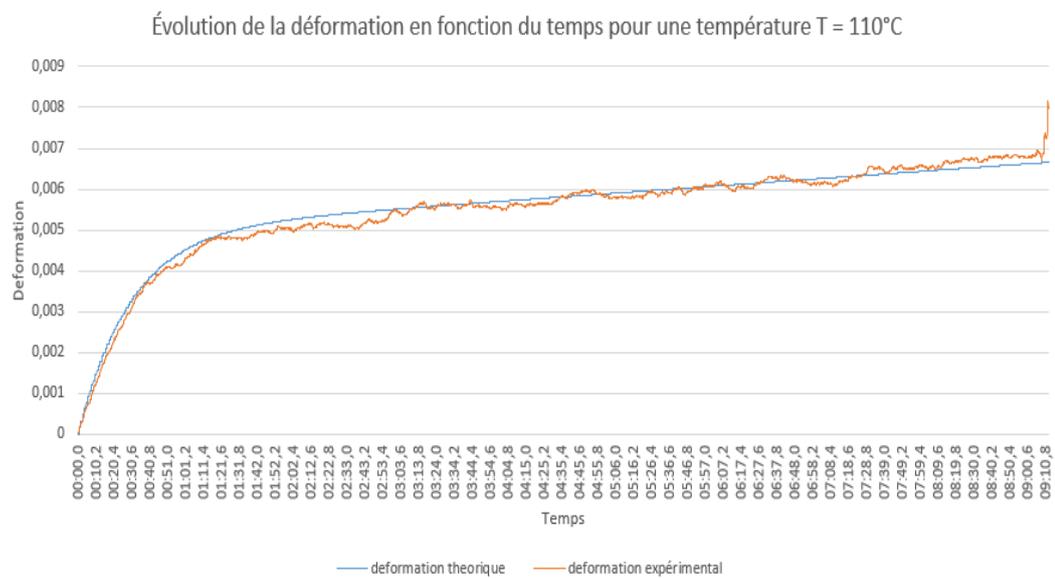


Figure 75 : Déformation du PVC en fonction du temps pour une température $T = 110^{\circ}\text{C}$

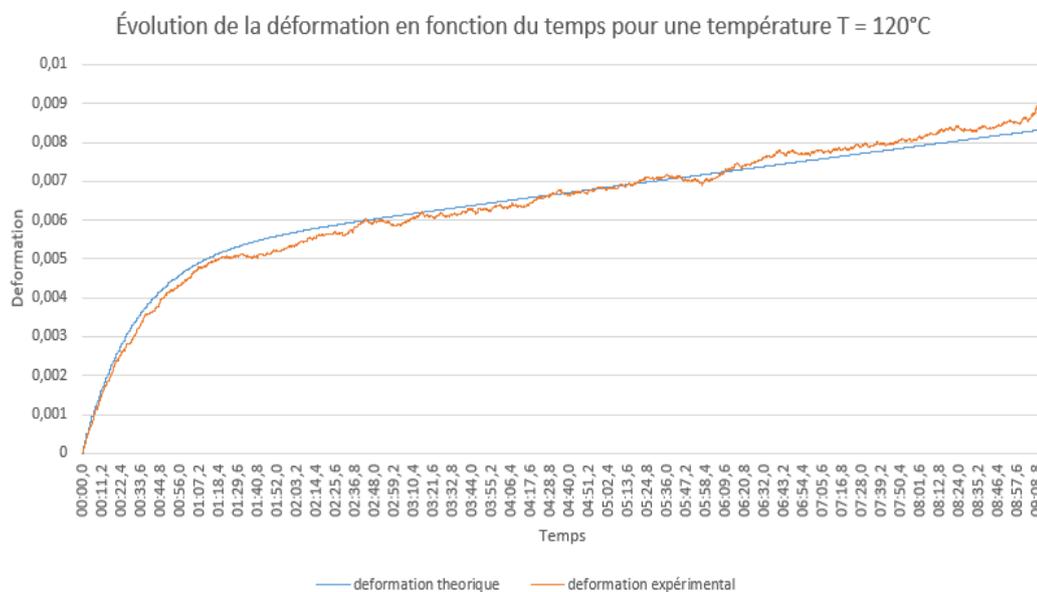


Figure 76 : Déformation du PVC en fonction du temps pour une température T = 120°C

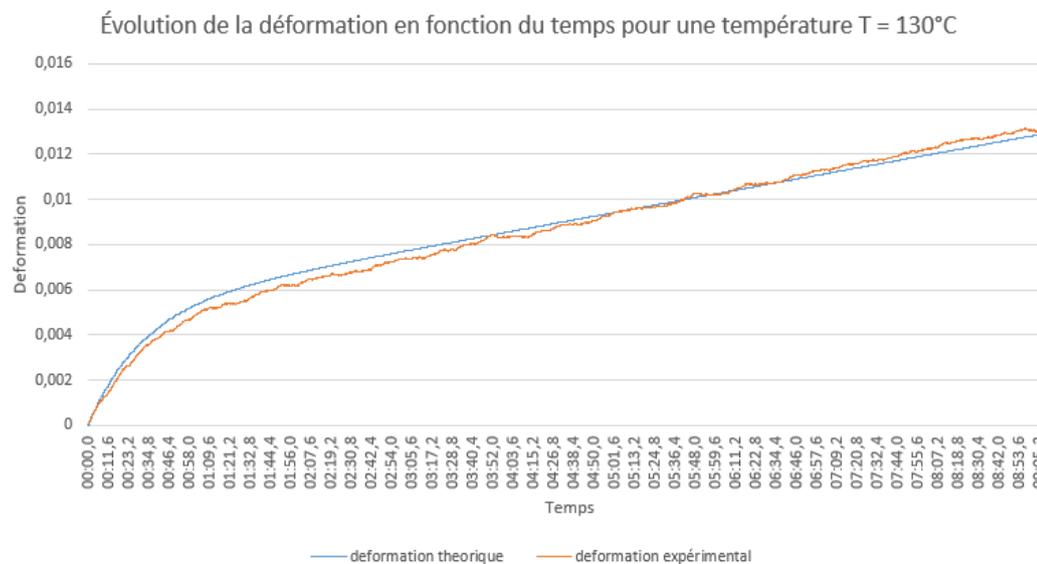


Figure 77 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 130°C

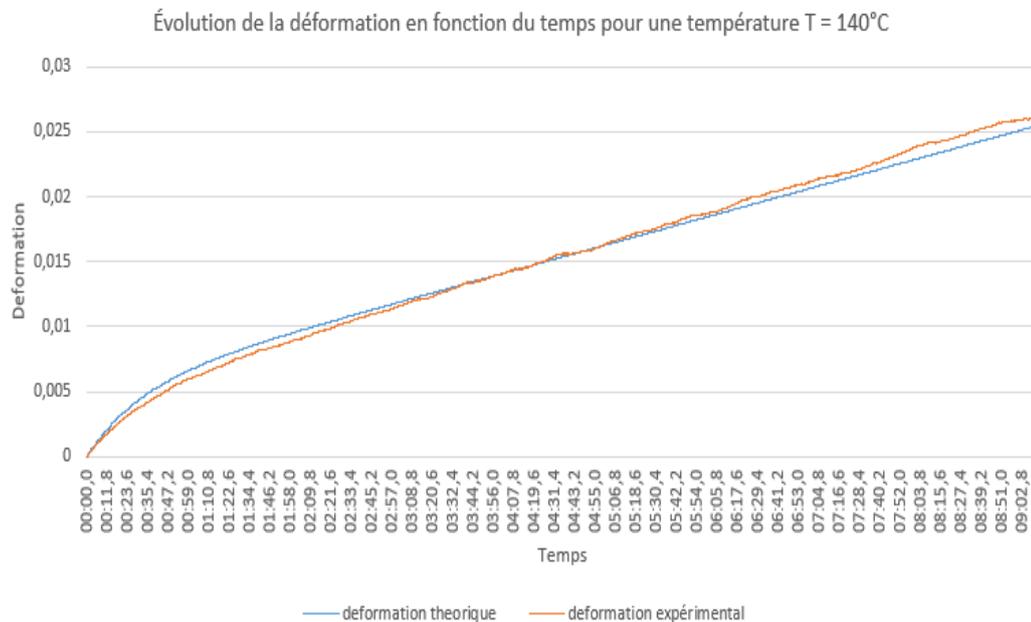


Figure 78 : Déformation du PP en fonction du temps pour une température T = 140°C

Les graphiques examinés montrent clairement que le modèle à trois paramètres visqueux correspond bien aux courbes de déformation expérimentales, indépendamment des températures testées. Les coefficients de détermination R² sont élevés, indiquant une corrélation étroite entre les données expérimentales et le modèle. Comme précédemment (pour ABS, HIPS, PP), l'ajout d'un amortisseur en série au modèle s'est également avéré efficace, car la partie visqueuse du nouveau modèle suit parfaitement la courbe expérimentale. Ainsi, il est conclu que le modèle modifié de Burgers à trois paramètres est bien adapté pour modéliser l'affaissement de membranes circulaires en PVC sous l'influence de la température et de la gravité.

Les trois paramètres identifiés du modèle modifié de Burgers (viscosité η_1 , η_2 et rigidité E) en fonction de la température sont présentés dans le tableau suivant, basé sur les essais expérimentaux.

Tableau 14 *Évolution de la rigidité et de la viscosité, relative au modèle de Berger modifié, du PVC en fonction de la température, comme décrite par le modèle à trois paramètres*

Température (°C)	E (MPa)	η_1 (Pa.s)	η_2 (Pa.s)
100	2580,6	7577,593456	804066
110	2537,3	7584,658656	409770
120	2496	7590,489826	211668
130	2449	7611,118322	88722
140	2396	7626,078991	64336

Le Tableau suivant présente les résultats d'identification de la viscosité totale (η) du matériau pour chaque température :

Tableau 15 *Valeurs numériques de E et η obtenus par modélisation pour le PVC*

Température (°C)	E (MPa)	η (Pa. s)	Coefficient de détermination R ²
100	2580,6	808920	0,994
110	2537,3	411416	0,996
120	2496	212092	0,998
130	2449	88900	0,998
140	2396	64400	0,999

La figure illustre une diminution importante de la viscosité déterminée par le modèle à trois paramètres visqueux, ce qui est cohérent avec les attentes, en raison de l'augmentation de la température.

Néanmoins, la relation entre la viscosité et la température est complexe et dépend de plusieurs facteurs tels que la composition, la structure moléculaire, la pression et la densité du matériau. C'est pourquoi il est crucial de poursuivre les études sur les propriétés viscoélastiques des matériaux à différentes températures pour améliorer leur compréhension et développer des modèles plus précis.

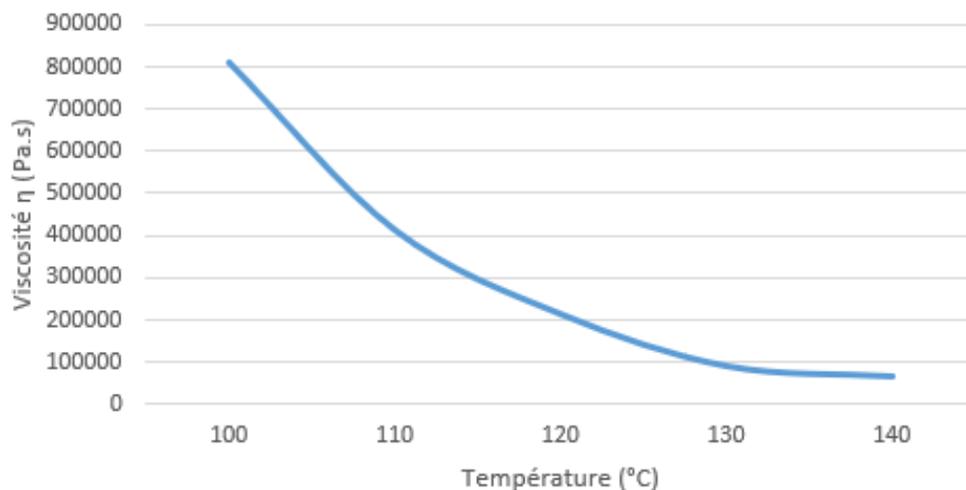


Figure 79 : Variation de la viscosité du PVC en fonction de la température (modèle de Burger modifié)

Comme illustré dans la Figure, la rigidité des membranes diminue presque de façon linéaire avec l'augmentation de la température, bien que cette diminution soit légère.

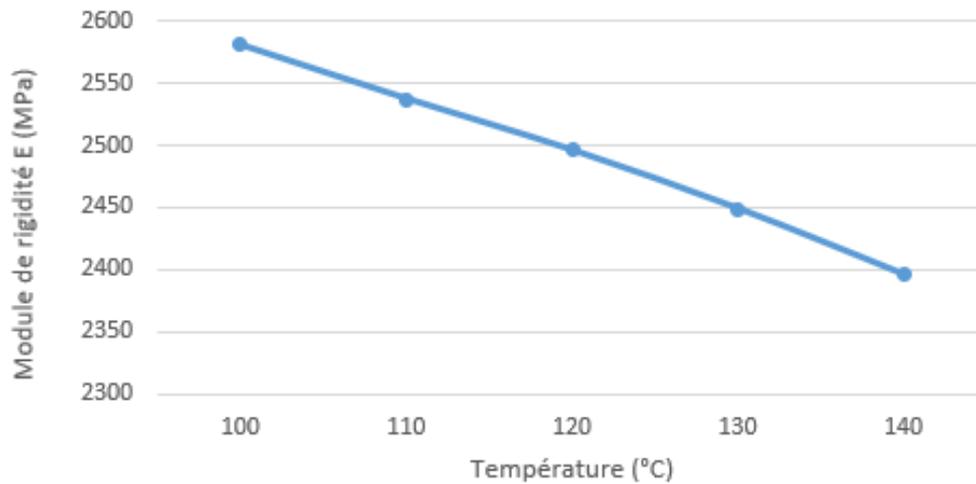


Figure 80 : Variation du module de rigidité du PVC en fonction de la température (modèle de Burger modifié)

2. Identification des lois thermiques relatives à la viscosité

La seconde partie de ce paragraphe traite de l'effet de la température sur la viscosité des membranes en ABS, HIPS, PP et PVC testées. Les modèles thermiques tels que Carreau, Ellis et Cross ont été décrits dans la littérature pour décrire la dépendance à la température de la viscosité des polymères (Besson, 2013 ; Djoudi, 2005). Cependant, la majorité des études se sont concentrées sur l'effet de la température sur le comportement viscoélastique des polymères en utilisant l'équation de William-Landel-Ferry (WLF) (voir chapitre 2).

Pour ce volet, nous avons comparé la variation de la viscosité de nos membranes avec ces modèles pour déterminer celui qui décrit le mieux l'effet de la température par l'entremise de la loi WLF. En général, une diminution de la viscosité est observée avec l'augmentation de la température en raison de la facilité de la mobilité des chaînes polymériques (Djoudi, 2005).

2.1. Loi WLF pour l'ABS

On peut modéliser la dépendance thermique de la viscosité des polymères à l'état fondu ou semi-solide en utilisant l'équation WLF (William-Landel-Ferry). Cette loi dépend de la viscosité de référence ($\eta_{ref} = \eta(T_{ref})$) à une température de référence (T_{ref}).

$$\eta_T = \eta_{T_{ref}} \exp\left(\frac{-C_1(T - T_{ref})}{T - T_{ref} + C_2}\right) \quad (\text{Equation 27})$$

Les coefficients C1 et C2, respectivement égaux à 7,6 et 160 ont été obtenus via une simulation numérique à l'aide de Matlab, en conservant une température de référence constante de $T = 100^\circ\text{C}$.

Tableau 16 Comparaison entre les valeurs de la viscosité déterminées par la simulation et celles calculées par l'équation WLF

Température (°C)	η (Pa.s) (Équation WLF)	η (Pa.s) (Modèle numérique)
100	388640	388640
110	262934	248537,724
120	170687	167035,944
130	130687	117056,119
140	80687	85000,1877

L'équation de William-Landel-Ferry (WLF) a été intégrée à l'outil Curve Fitting en utilisant la température de référence (T_{ref}) et la viscosité associée (η_{Tref}).

Grâce à une simulation numérique, les valeurs optimales de C_1 et C_2 ont été déterminées, et à partir de ces valeurs, la viscosité pour chaque température d'essai a été calculée. Les résultats sont présentés dans le Tableau ci-dessus.

Il est à noter que l'équation WLF a fourni des valeurs de viscosité assez proches de celles trouvées par notre modèle pour toutes les températures. Ce qui démontre l'efficacité de notre méthode de modélisation pour prédire la viscosité en fonction de la température.

Cette approche peut être utile pour une large gamme d'applications dans les domaines tels que la chimie, la physique, la biologie et l'ingénierie, où la prédiction de la viscosité est essentielle pour comprendre les propriétés physiques et mécaniques des matériaux.

La variation est comparée dans la Figure suivante :

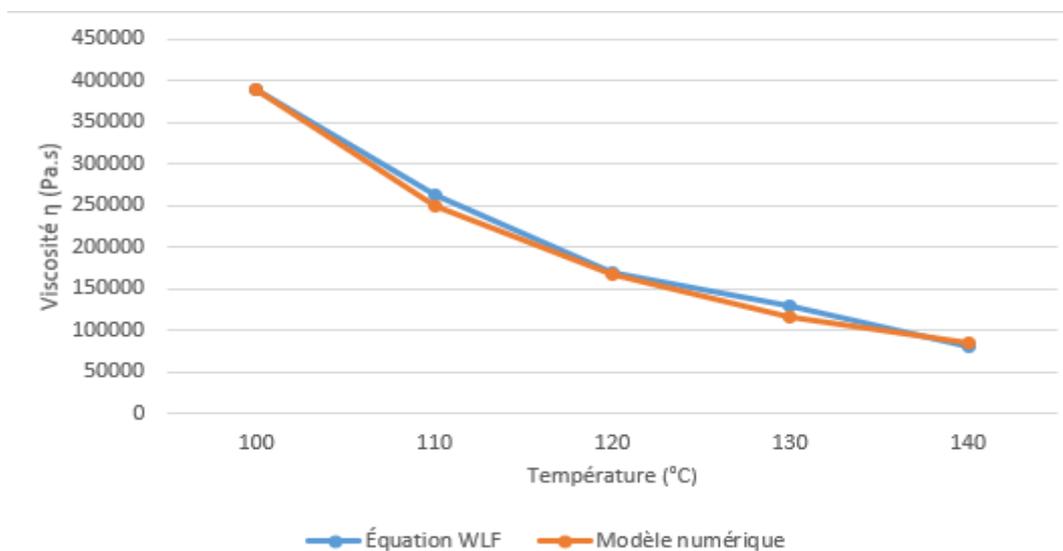


Figure 81 : Évolution de la viscosité de l'ABS en fonction de la température pour les deux modèles (trois paramètres visqueux, WLF)

2.2 Loi WLF pour le HIPS

De la même manière que l'ABS, nous avons utilisé l'équation (WLF). Les coefficients C1 et C2, respectivement égaux à 9 et 150 °C, ont été obtenus via une simulation numérique à l'aide de Matlab, en conservant une température de référence constante de $T = 100^{\circ}\text{C}$.

Tableau 17 Comparaison entre les valeurs de la viscosité déterminées par la simulation et celles calculées par l'équation WLF

Température (°C)	η (Pa.s) (Équation WLF)	η (Pa.s) (Modèle numérique)
100	598500	598500
110	340000	341015,021
120	228300	207597,892
130	131550	133543,401
140	90000	89989,2018

Les valeurs optimales de C1 et C2 ont été déterminées par simulation numérique pour calculer la viscosité à chaque température d'essai, comme présenté dans le tableau ci-dessus. L'équation WLF a fourni des valeurs de viscosité proches de notre modèle, montrant l'efficacité de notre méthode de modélisation pour prédire la viscosité.

Cette approche peut être utile pour de nombreuses applications en sciences où la prédiction de la viscosité est importante, comme expliqué ci-dessus. La variation est visualisée dans la figure suivante.

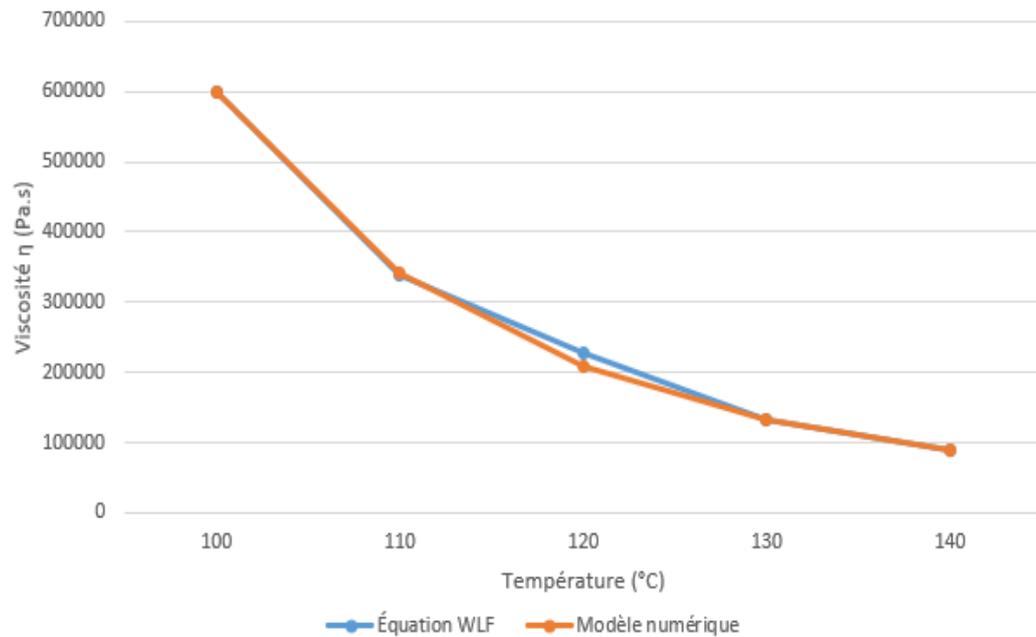


Figure 82 : Évolution de la viscosité du HIPS en fonction de la température pour les deux modèles (trois paramètres visqueux, WLF)

2.3 Loi WLF pour le PP

Tout comme les matériaux précédents, nous utiliserons l'équation WLF. Les coefficients C_1 et C_2 ont été obtenus via une simulation numérique avec Matlab, en conservant une température de référence constante de $T = 100^\circ\text{C}$. Les valeurs de ces coefficients sont respectivement de 9 et 150°C .

Tableau 18 *Comparaison entre les valeurs de la viscosité déterminées par la simulation et celles calculées par l'équation WLF*

Température (°C)	η (Pa.s) (Équation WLF)	η (Pa.s) (Modèle numérique)
100	598500	598500
110	340000	341015,021
120	228300	207597,892
130	131550	133543,401
140	90000	89989,2018

En déterminant les valeurs optimales de C1 et C2 par simulation numérique, nous avons pu calculer la viscosité pour chaque température d'essai, comme présenté dans le tableau ci-dessus. Nous avons constaté que l'équation WLF a fourni des valeurs de viscosité proches de celles obtenues par notre modèle, démontrant ainsi l'efficacité de notre méthode de modélisation pour prédire la viscosité en fonction de la température. La variation de la viscosité en fonction de la température est présentée dans la figure suivante.

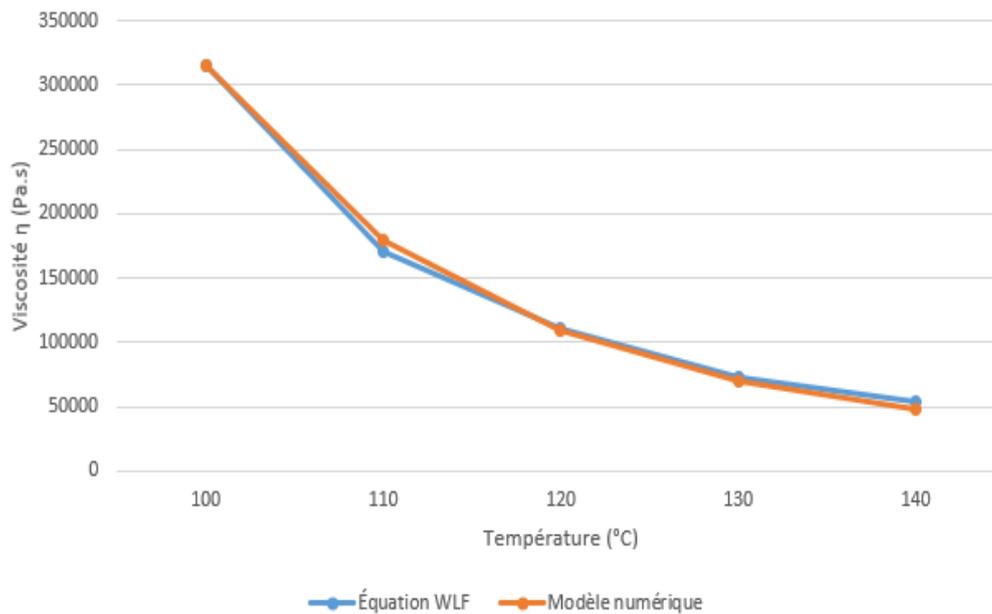


Figure 83 : Évolution de la viscosité du PP en fonction de la température pour les deux modèles (trois paramètres visqueux, WLF)

2.4 Loi WLF pour le PVC

De manière similaire aux matériaux précédents, l'équation WLF sera utilisée. Les coefficients C_1 et C_2 ont été obtenus par simulation numérique avec Matlab, en maintenant une température de référence constante de $T = 100^\circ\text{C}$. Les valeurs de ces coefficients sont respectivement de 6 et 70°C .

Tableau 19 *Comparaison entre les valeurs de la viscosité déterminées par la simulation et celles calculées par l'équation WLF*

Température (°C)	η (Pa.s) (Équation WLF)	η (Pa.s) (Modèle numérique)
100	808920	808920
110	411416	382106,752
120	212092	213228,997
130	108900	133713,577
140	64400	91275,4486

En utilisant la simulation numérique pour déterminer les valeurs optimales de C1 et C2, nous avons calculé la viscosité pour chaque température d'essai, présentée dans le tableau ci-dessus. L'efficacité de notre méthode de modélisation pour prédire la viscosité a été démontrée par la proximité des valeurs de viscosité fournies par l'équation WLF et celles obtenues par notre modèle. La figure suivante présente la variation de la viscosité en fonction de la température, permettant une meilleure compréhension de la relation entre ces deux variables et aidant à interpréter les résultats obtenus par notre modèle.

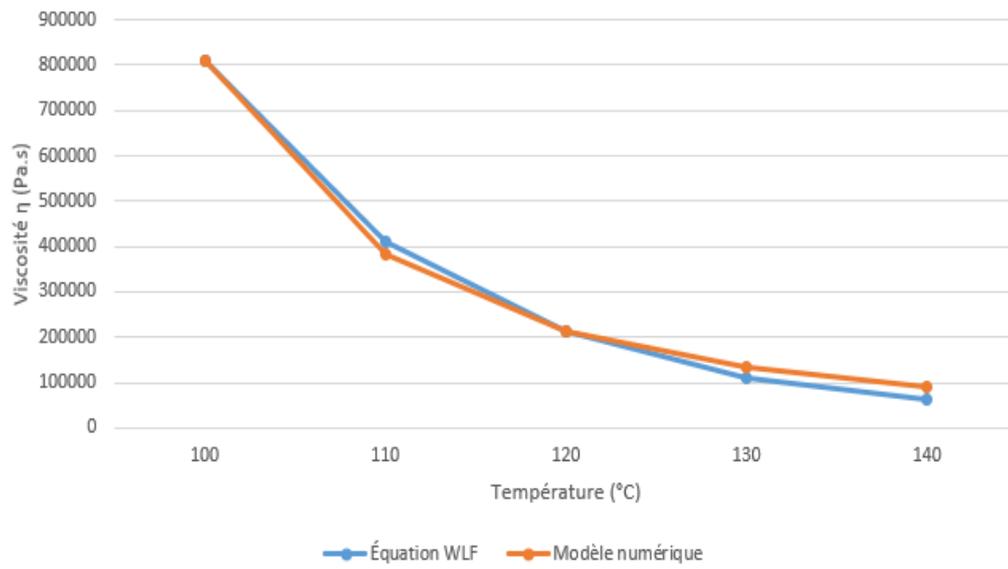


Figure 84 : Évolution de la viscosité du PVC en fonction de la température pour les deux modèles (trois paramètres visqueux, WLF)

CONCLUSION

La simulation numérique du processus de thermoformage des matériaux polymériques revêt une importance cruciale dans l'industrie pour garantir une production efficace et de haute qualité. Cependant, il est intéressant de noter que peu d'attention a été accordée jusqu'à présent à la caractérisation du comportement des thermoplastiques lorsqu'ils sont soumis à la conjonction de la force gravitationnelle et des variations de température lors de l'étape de chauffage dans le processus de thermoformage. C'est précisément dans cette optique que ce projet a été lancé, avec pour objectif principal la caractérisation viscoélastique du comportement de plusieurs membranes thermoplastiques couramment utilisées, notamment l'ABS, le HIPS, le PP et le PVC. C'est dans le cadre de cette étude, que le projet est inscrit et il concerne l'identification viscoélastique de la famille de composites ABS, HIPS, PP et PVC. L'ensemble des expériences ont été réalisées dans un four à convection, avec des températures variantes entre 100°C et 140°C. Pour modéliser numériquement le comportement viscoélastique, nous avons choisi le modèle de Burger modifié à trois paramètres. Les paramètres mécaniques spécifiques à chaque matériau ont été obtenues à l'aide de l'application d'un algorithme basé sur la méthode des moindres carrés, par l'entremise de Logiciel Matlab. Par ailleurs, nous avons recours à l'équation de William-Landel-Ferry (WLF) pour caractériser la dépendance thermique des paramètres mécaniques obtenus pour chaque matériau.

La connaissance approfondie du comportement viscoélastique de ces matériaux revêt une importance pour comprendre comment les thermoplastiques réagissent aux contraintes mécaniques et aux variations de température, deux facteurs cruciaux dans le processus de thermoformage industriel..

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELGHANI, M. 2009. *Caractérisation des membranes thermoplastiques par une approche neurale*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue; Université du Québec à Chicoutimi.
- ALEXANDER, H. 1971. Tensile instability of initially spherical balloons. *International Journal of Engineering Science*, 9, 151-160.
- BAZANT, Z. P. 1972. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective. *J. Am. Concr. Inst*, 69, 212-217.
- BEN AOUN, N. Modélisation expérimentale et numérique de l'effet combiné de la température et de la force de gravité sur le comportement des membranes thermoplastiques. Mémoire de maîtrise (2019), UQAT (Québec).
- BEN AOUN, N., ERCHIQUI, F., MRAD, H., DITUBA-NGOMA, G. & GODARD, F. 2020b. Viscoelastic characterization of high-density polyethylene membranes under the combined effect of the temperature and the gravity for thermoforming applications. *Polymer Engineering and Science*, 60, 2676-2684.
- BENHARBIT, M. 2007. *Caractérisation hyperélastique des membranes thermoplastiques par une approche utilisant les réseaux de neurones*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue; Université du Québec à Chicoutimi.
- BENJEDDOU, A., JANKOVICH, E. & HADHRI, T. 1993. Determination of the parameters of Ogden's law using biaxial data and Levenberg-Marquardt-Fletcher algorithm. *Journal of Elastomers & Plastics*, 25, 224-248.
- BIOUD, A. 2020. *Optimisation de chauffage infrarouge d'une structure thermoplastique courbée à l'aide du recuit simulé*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- CHEVALIER, Y. 1988. Comportements élastique et viscoélastique des composites. *Techniques de l'Ingénieur*, 5.
- CHEVAUGEON, N., MARCKMANN, G., VERRON, E. & PESEUX, B. Instabilités et bifurcations de membranes. 2^{me} Congrès National en Calcul des Structures, 2001.
- CHEVAUGEON, N., VERRON, E. & PESEUX, B. Finite element analysis of non linear transversely isotropic hyperelastic membranes for thermoforming applications. ECOMAS 2000, 2000.

- DELORENZI, H., NIED, H. & TAYLOR, C. 1991. A numerical/experimental approach to software development for thermoforming simulations. *Journal of Pressure Vessel Technology(Transactions of the ASME)*, 113, 102-114.
- DERDOURI, A., ERCHIQUI, F., BENDADA, A., VERRON, E. & PESEUX, B. Viscoelastic behaviour of polymer membranes under inflation. XIII International Congress on Rheology, 2000. 394-396.
- EL HADJI BABACAR, L. 2008. *Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- ELLOUMI, I. 2016. *Caractérisation des propriétés diélectriques du bois et des composites bois-polymère*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- ERCHIQUI, F. & DERDOURI, A. 2005. Analyse Expérimentale et Numérique du Comportement de Membranes Thermoplastiques en ABS et en HIPS dans le Procédé de Thermoformage. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83, 527-536.
- ERCHIQUI, F., DERDOURI, A., GAKWAYA, A. & VERRON, E. 2001. Analyse expérimentale et numérique en soufflage libre d'une membrane thermoplastique. *Entropie (Paris)*, 37, 118-125.
- ERCHIQUI, F., DERDOURI, A. & LAROCHE, D. Biaxial characterization of softened polymers. Polymer Processing Society, "North American Meeting, Toronto, Ontario, Canada, August, 1998. 17-19.
- ERCHIQUI, F., IMAD, A., MOULOUDI, A. & HSNAOUI, F. S. 2010a. Caractérisation viscoélastique du comportement d'une membrane thermoplastique et modélisation numérique de thermoformage. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 88, 116-125.
- ERCHIQUI, F., IMAD, A., MOULOUDI, A. & HSNAOUI, F. S. 2010b. Characterization of viscoelastic behavior of a membrane thermoplastic and numerical modeling thermoforming. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 88, 116-125.
- ERCHIQUI, F., OZDEMIR, Z., SOULI, M., EZZAIDI, H. & DITUBA-NGOMA, G. 2011. Neural networks approach for characterisation of viscoelastic polymers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89, 1303-1310.
- ERCHIQUI, F., SOULI, M. & ALIA, A. Modélisation de l'effet d'un gaz réel sur le soufflage libre d'une structure viscoélastique. CFM 2007-18ème Congrès

- Français de Mécanique, 2007. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- FOND, C. & G'SELL, C. 2002. Localisation des déformations et mécanismes d'endommagements dans les polymères multiphases. *Mécanique & industries*, 3, 431-438.
- FORTUNIER, R. 2001. Comportement mécanique des matériaux. *cours, ENS des Mines de Saint-Etienne*, 214.
- GIAKOUMAKIS, V., ROUSSEL, F. & THUILLIER, H. 1997. On P₄-tidy graphs. *Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, 1, 17-41.
- GOSSELIN, R. 2005. Injection de mousses composites bois/plastiques d'origine post-consommation.
- HAMANI, I. 2016. *Modélisation de l'Étape de Chauffage Infrarouge des Biocomposites de type PET-chanvre en Thermoformage*. Université du Québec à Chicoutimi.
- HICHEM, L. 2017. *Identification par DSC des caractéristiques du PEHD chargé de noir de carbone*. UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA.
- LAROCHE, D. & ERCHIQUI, F. 1999. Experimental and theoretical study of the thermoformability of industrial polymers. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 15, 287-296.
- LEPETIT, A., DROLET, R., TOLNAI, B., MONTPLAISIR, D. & ZERROUKI, R. 2017. Alkylation of microfibrillated cellulose—A green and efficient method for use in fiber-reinforced composites. *Polymer*, 126, 48-55.
- LETTVIN, J. Y., MATURANA, H. R., MCCULLOCH, W. S. & PITTS, W. H. 1965. *What the frog's eye tells the frog's brain*, na.
- LIANG, B. 2016. *Experimental and numerical study of the bending behaviour of textile reinforcements and thermoplastic prepregs*. Lyon.
- MALKIN, A. Y. & ISAYEV, A. I. 2017. *Rheology: concepts, methods, and applications*, Elsevier.
- MIAO, C. & HAMAD, W. Y. 2013. Cellulose reinforced polymer composites and nanocomposites: a critical review. *Cellulose*, 20, 2221-2262.
- MOREAU, A. 2007. *Identification de propriétés viscoélastiques de matériaux polymères par mesures de champs de réponses en fréquence de structures*. Rouen, INSA.
- OUELLETTE, G. 2018. *Étude d'un système de cintrage thermomécanique pour un profilé de PVC ou de polypropylène*. Université du Québec en Abitibi-T. miscamingue.

- SAIFOUNI, O. 2014. *Modélisation des effets rhéologiques dans les matériaux: application au comportement mécanosorptif du bois*. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- TAZI, M. 2015. *Valorisation des sciures de bois dans des composites thermoplastiques (HDPE-BOIS): élaboration, caractérisation et modélisation en soufflage libre*. Université du Québec à Chicoutimi.
- TITUS, J. B. 1972. Solid-Phase Forming (Cold Forming) of Plastics. PLASTICS TECHNICAL EVALUATION CENTER PICATINNY ARSENAL NJ.
- TRELOAR, L. 1944. Stress-strain data for vulcanized rubber under various types of deformation. *Rubber Chemistry and Technology*, 17, 813-825.
- VERRON, E. 1997. *Contribution expérimentale et numérique aux procédés de moulage par soufflage et de thermoformage*.
- VERRON, E., MARCKMANN, G. & PESEUX, B. 2001. Dynamic inflation of non-linear elastic and viscoelastic rubber-like membranes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50, 1233-1251.
- WINEMAN, A. S. 1976. Large axisymmetric inflation of a nonlinear viscoelastic membrane by lateral pressure. *Transactions of the Society of Rheology*, 20, 203-225.
- YAN, N. D., DUNLOP, W. I., PAWSON, T. W. & MACKAY, L. E. 1992. Bythotrephes cederstroemi (Schoedler) in Muskoka lakes: first records of the European invader in inland lakes in Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49, 422-426.
- ZAAFRANE, K. 2019. *Caractérisation expérimentale et numérique du comportement des membranes nanocomposites en soufflage libre*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- ZHANG, C. 2000. *Fracture mechanisms in wood fibre reinforced polyethylene*.
- ZHI-QIANG, F. 2005. Mécanique non linéaire. *Livre. UFR Science et Technologies, Université d'Evry Val d'Essonne, 91p*.
- KOUASSI, K. A. E. A. (2013). " *L'utilisation des tuyaux annelés en polyéthylène pour l'assainissement en Côte d'Ivoire. Quelle rentabilité?* " Institut national polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire. 100 p.

Benharbit, M. (2007). *Caractérisation hyperélastique des membranes thermoplastiques par une approche utilisant les réseaux de neurones* (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue; Université du Québec à Chicoutimi).

Maddi, A., Guessoum, A., Berkani, D., & Belkina, O. (2005, March). Etude de la méthode des moindres carrés réursive et application au signal de parole. In *3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, Sousse, Tunisia*.

CORTIAL, Y. (1990). A propos de la méthode des moindres carrés. *Bull. Un. Phys*, 84(725), 769-791.

BEN AOUN N. 2019, CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT VISCOÉLASTIQUE D'UNE MEMBRANE EN PEHD SOUS L'EFFET DE LA TEMPERATURE ET DE LA GRAVITÉ, Mémoire de maitrise. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, UQAT.

Rivlin, R. S. (1948). Large elastic deformations of isotropic materials IV. Further developments of the general theory. *Philosophical transactions of the royal society of London. Series A, Mathematical and physical sciences*

Ogden, R. W. (1972). Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 326(1567),