

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE
LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE-CONCENTRATION GÉNIE
MÉCANIQUE

PAR

Thierry Edgard Patrick FOKAM TAFOCK

ÉTUDE COMPARATIVE DU COMPORTEMENT
THERMOMÉCANIQUE ET EN TRIBOLOGIE DES COMPOSITES
DE FIBRES NATURELLES RECYCLES ET NON RECYCLES

NOVEMBRE 2020

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉTUDE COMPARATIVE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE ET EN TRIBOLOGIE DES COMPOSITES DE FIBRES NATURELLES RECYCLES ET NON RECYCLES

Ce mémoire a été dirigé par :

Demagna Koffi, Ing, Ph.D., directeur de recherche, Professeur Université du Québec à Trois-Rivières

Jury d'évaluation du mémoire :

Demagna KOFFI, Ing, Ph.D., directeur de recherche, Professeur Université du Québec à Trois-Rivières.

Lotfi TOUBAL, Ing, Ph.D., Professeur Université du Québec à Trois-Rivières.

Fouad ERCHIQUI, Ing., Ph.D., Professeur Université du Québec en Abitibi Témiscamingue

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail,

À Mon Papa chéri, Monsieur Martin FOKAM

Les mots me manquent pour te témoigner mon profond respect et mon attachement si grands. Tu n'as ménagé aucun effort pour la réussite et le bien-être de tes enfants et de toute la famille.

De par l'éducation que tu nous as donnée, tu as su nous inspirer des valeurs essentielles telles la générosité, la fraternité, la dignité, l'humilité, la persévérance, la confiance en soi, le bon sens et bien d'autres. Tes enseignements et ton amour constituent nos armes et tes prières notre bouclier.

Tu es et seras toujours mon héros et mon idole.

À Ma Maman chérie, Julienne FOKAM

La femme la plus merveilleuse du monde, ma référence, mon socle.

Je ne saurais une fois encore renouveler tout l'amour et la reconnaissance de tant d'années de sacrifices consentis pour mon bien être.

Femme de principe et de morale, tu as toujours su nous guider et nous éduquer ;

Merci pour tes prières, ta patience et ton amour sans faille. Mon vœu le plus cher est de te combler de bonheur. Puisse le Dieu tout puissant me l'accorder.

À Mes Frères et Sœurs Elvire Floriane FOKAM, Blandine Victoire FOKAM, Aurore Suzanne FOKAM, Alex Audry NOUSSI.

Mes meilleurs amis et meilleurs confidents.

C'est l'occasion pour moi de vous témoigner de ma profonde gratitude et ma grande reconnaissance. La vie de famille menée ensemble m'a permis de voir combien vous comptez pour moi. Puisse Dieu nous laisser unis dans la tendresse, la solidarité, l'amour, la confiance en tous et fidèle à l'éducation que nous ont donnée nos parents.

Je vous aime

À une personne qui m'est très chère

Chère Marlyn MOMO FOPOSSI, je te remercie pour ton soutien affectif et moral. Tu m'as permis lors de cette phase difficile de ma vie de comprendre à quel point je pouvais compter sur toi. Pour cela, je te remercie du fond du cœur, ton amour est sans limites.

Je t'aime.

REMERCIEMENTS

À Notre Maître et Président du Jury ; Mr

Cher maître, nous vous remercions d'avoir accepté présider ce jury. Malgré vos multiples occupations, vous nous faites honneur en acceptant de présider ce jury. Votre sens élevé du respect de la personne et votre goût du travail bien fait font de vous une référence sûre pour nous et les générations futures.

Aucun mot ne pourra traduire mon profond respect, mon estime, mon immense gratitude et ma respectueuse admiration. Vous incarnez la grandeur de l'homme par votre générosité, votre disponibilité et votre professionnalisme.

À notre Professeur et directeur de recherche Demagna KOFFI

Cher Prof, nous vous remercions pour votre encadrement. Vous nous avez aidés et soutenus tout au long de ce travail, vous nous avez permis de trouver des solutions face aux multiples difficultés liées à l'aboutissement de ce travail. Vous nous avez séduits par votre contact facile et votre disponibilité.

À ces qualités humaines, s'ajoute la rigueur scientifique hors du commun, faisant de vous un professeur modèle.

Aucun mot ne pourra traduire mon profond respect, mon estime, mon immense gratitude et ma respectueuse admiration. Vous incarnez la grandeur de l'homme par votre générosité, votre disponibilité et votre professionnalisme.

Permettez-nous de vous exprimer l'assurance de notre profonde reconnaissance et sincère remerciement.

À tous les Professeurs et Enseignants du Département Génie mécanique et Génie Industriel

Vous nous avez donné un bagage intellectuel technique sans égal, tant sur le plan théorique que pratique. Je vous dirais merci pour votre engagement pour le bon déroulement de notre formation.

Veuillez recevoir l'expression de mes sincères remerciements pour tous ces bienfaits.

À tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail

Sincères remerciements pour tous les efforts consentis.

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur le comportement d'usure des engrenages en composites, plus particulièrement sur l'impact du plastique recyclé sur les propriétés mécaniques et de tribologie desdits composites. D'un côté, nous avons les composites à base de plastique vierge et de l'autre des composites à base de plastique recyclé. Pour affiner nos recherches, des essais expérimentaux de chacun des deux types de composite ont été effectués. Ils ont porté sur des éprouvettes sous forme d'engrenages cylindriques à denture droite et des disques normalisés. Des essais de simulation de contact de roulement/glisser des disques et de fonctionnement réel des engrenages ont été effectués à sec. Les mesures de perte de masse, de perte de couple, de la température dans la zone de contact et le coefficient de frottement ont été enregistrées afin de mieux étudier les performances de tribologie des deux groupes des composites recyclés et non recyclés.

La comparaison des résultats obtenus lors d'essais sur engrenages et ceux obtenus lors des essais de simulation de contact de roulement / glissement combiné à double disque nous ont permis de constater d'une part que les meilleurs pourcentages (20% à 24% HDPE recyclé) de mélange composites HDPE recyclés donnait des résultats de module et de contraintes inférieures à ceux des meilleurs pourcentages (57% et 67% de HDPE vierge soit 30% et 40% de fibres) de mélange composite HDPE vierges.

D'autres part, le profil des pertes de masses enregistrées lors des analyses thermomécaniques permet d'établir que dans tous les cas, la perte de masse est plus importante pour les composites HDPE recyclé. En revanche pour l'usure on observe un phénomène contraire. En effet on constate que l'usure des composites HDPE avec du polymère recyclé est bien plus faible que l'usure des composites HDPE avec du polymère vierge.

Pour finir ; l'étude du comportement thermique des essais thermomécanique et tribologique révèle des valeurs de température très élevées pour les composites HDPE recyclés comparativement aux composites HDPE vierges. Il en est de même pour l'étude du couple et des coefficients de frottement.

Cette étude met de l'avant certains attraits avantageux de l'usage des HDPE avec du polymère recyclé dans la fabrication des composites ; notamment la réduction des coûts par la réduction du pourcentage de HDPE vierge dans le mélange.

Mots clés : Matériaux, composites, comportement, engrenages, thermoplastiques, tribologie, usure, thermomécanique

ABSTRACT

This study focuses on the wear behaviour of composite gears, more specifically on the impact of recycled plastic on the mechanical and tribological properties of said composites. On the one hand, we have composites made from virgin plastic and on the other we have composites made from recycled plastic. To refine our research, experimental tests of each of the two types of composite were carried out. They focused on test specimens in the form of spur and standard discs. Simulation testing of rolling contact or disc slip and actual operation of the gears were performed in dry conditions. The measurements of mass loss, torque loss, temperature in the contact zone and the coefficient of friction were recorded in order to better study the tribological performances of the 2 groups of recycled and non-recycled composites.

The comparison of the results obtained during tests on gears and those obtained during the simulation tests of rolling contact / sliding combined with a double disc allowed us to note, on the one hand, that the best percentage (20% to 24% recycled HDPE) of recycled HDPE composite blends gave lower modulus and stress results than the best percent (30% and 40% fibers) of virgin HDPE composite blends.

In addition, the profile of mass losses recorded during thermomechanical analyzes establish that in all cases, the mass loss is greater for recycled HDPE composites. On the other hand, for wear we observe the opposite phenomenon. Indeed, we see that the wear of recycled HDPE composites is much lower than the wear of virgin HDPE composites

Finally, the study of the thermal behaviour of thermomechanical and tribological tests reveals very high temperature values for recycled HDPE composites compared to virgin HDPE composites. It is the same for the study of the torque and the friction coefficients.

This study highlights certain advantages of the use of recycled HDPE in the manufacture of composites; in particular cost reduction by reducing the percentage of virgin HDPE in the mixture.

Keywords: Materials, composites, behaviour, gears, thermoplastics, tribology, wear, thermomechanics

TABLE DES MATIÈRES

<i>DÉDICACES</i>	<i>i</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>iii</i>
<i>RÉSUMÉ</i>	<i>v</i>
<i>Abstract</i>	<i>vii</i>
<i>Table des matières</i>	<i>viii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xv</i>
<i>Chapitre 1 : INTRODUCTION</i>	<i>I</i>
1.1 – Introduction et mise en contexte	2
1.2 – Problématique :.....	3
1.3 – Question de recherche :.....	4
1.4 – Objectifs.....	4
1.4.1 – Objectif principal :	4
1.4.2 – Objectifs secondaires :	4
1.5 – Mesures de performance :	5
1.6 – Concepts :	5
1.7 Structure du mémoire	5
<i>Chapitre 2 : REVUE DE LA LITTERATURE ET DIAGRAMME D'ISHIKAWA</i>	7
2.1 – Revue de littérature	8
2.1.1 – Présentation des fibres naturelles	8
2.1.1.1 – Structure et propriété physique	9
2.1.2 – Propriétés physiques et mécaniques des fibres de bois.....	9
2.1.3 – Les fibres de bouleau jaune.....	10
2.1.4 – Propriétés mécaniques des fibres de bouleau jaune	10
2.2 – Matrices thermoplastiques.....	11
2.2.1 – Le polyéthylène.....	11
2.3 – Composite polyéthylène/bouleau.....	12
2.3.1 – Élaboration des matériaux composites pour engrenages	13
2.4 – Module élastique des composites thermoplastiques à fibres courtes	13
2.4.1 – Le modèle de Halpin-Tsai.....	14
2.5 – Comportement thermique des engrenages en thermoplastique et composites	15
2.5.1 – Modèle thermique : modèle de Block	15
2.5.2 – Modèle thermique : modèle de Hooke	16
2.6 – Tribologie des matériaux d'engrenages.....	18
2.6.1 – Circuit tribologique	20
2.6.2 – Les frottements.....	21

2.6.2.1 – Le coefficient de frottement statique.....	21
2.6.2.2 – Le coefficient de frottement dynamique	21
2.6.3 – L’usure	22
2.6.3.1 – Usure adhésive ou glissement	23
2.6.3.2 – Usure par fretting	23
2.6.3.3 – Usure érosive.....	24
2.6.4 – Les mécanismes d’usure et de dégradation de surfaces	24
2.6.5 – Procédures d’essais de frottement et d’usure d’engrenages.....	24
2.6.6 – Ouvrages et études consultés	26
2.7 – Synthèse des différentes variables importantes la revue de littérature.....	32
Chapitre 3 : MÉTHODOLOGIE	34
 3.1 – Méthodologie	35
 3.2 - Plan d’expérience des mélanges : Répartition des pourcentages par mélanges ...	35
3.2.1 – Cas des mélanges à base de polyéthylène HDPE vierge	36
3.2.2 – Cas des mélanges à base de polyéthylènes HDPE vierges et recyclés	36
 3.3 – Fabrication de la pâte composite contenant du HDPE vierge.....	38
3.3.1 – Choix de la matrice polymère	38
3.3.2 – Les fibres de bois pour le renfort du composite	39
3.3.3 – L’agent de couplage	40
3.3.4 – La préparation des mélanges.....	40
3.3.5 – Procédure pour la fabrication de la pâte composite contenant du HDPE vierge ..	42
 3.4 – Fabrication de la pâte composite contenant du HDPE vierge et du HDPE recyclé	45
3.4.1 – Choix des différents éléments constitutifs du mélange.....	45
3.4.2 – Choix de la matrice ou du polymère	45
3.4.3 – Procédure pour la fabrication de la pâte composite HDPE vierge/HDPE recyclé/fibre de Bouleau jaune.....	46
 3.5 – Fabrication des éprouvettes composites pour les tests	47
3.5.1 – Fabrication d’éprouvettes de traction.....	48
3.5.1.1 – Schéma de Principe et principe de fonctionnement d’une presse pressent à injection	48
3.5.1.2 – Caractéristiques du modèle et les éprouvettes obtenues par injection	50
3.5.2 – Fabrication d’éprouvettes d’engrenages pour les tests thermomécaniques	51
3.5.2.1 – Vérification de conformité des éprouvettes obtenues	52
3.5.2.2 – Validation et sélection des éprouvettes d’engrenages	54
3.5.3 – Fabrication d’éprouvettes rondelles ou disques pour les tests de tribologie.....	54
3.5.3.1 – Les éprouvettes obtenues.....	55
 3.6 – Tests et essais mécanique, thermomécanique et tribologique	56
3.6.1 – Essais mécaniques sur les éprouvettes de traction	56
3.6.1.1 – Plan d’expérience : essais de traction.....	56
3.6.2 – Essais thermomécaniques sur les éprouvettes d’engrenages	57
3.6.2.1 – Schéma de principe et principe de fonctionnement de l’essai.....	57
3.6.2.2 – Plan d’expérience : essais de traction.....	59

3.6.2.3 – Mesures d’usure, et de couple	60
3.6.2.4 – Mesures thermiques.....	60
3.6.3 – Essais de tribologie sur les éprouvettes de rondelles	60
3.6.3.1 – Schéma de principe et principe de fonctionnement d’un test de tribologie..	61
3.6.3.2 – Variables des tests	62
3.6.3.3 – Plan d’expérience : essais de tribologie	62
3.6.3.4 – Acquisition des données.....	63
<i>Chapitre 4 : ANALYSES ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS</i>	65
4.1 – Analyses et interprétations des résultats des essais de traction.....	66
4.1.1 – Cas des éprouvettes en composites de HDPE vierge.....	66
4.1.2 – Cas des éprouvettes composites de HDPE vierge et HDPE recyclés	69
4.1.3 – Analyse comparative des résultats des essais de traction	72
4.2 – Analyses et interprétations des résultats des essais thermomécaniques.....	75
4.2.1. – Cas des éprouvettes en composites d’engrenages HDPE vierges	76
4.2.1.1 – Analyse de la perte de masse à 500 tr/min	76
4.2.1.2 – Analyse de la perte de masse à 1000 tr/min	78
4.2.1.3 – Analyse de la perte de masse à 1500 tr/min	79
4.2.1.4 – Récapitulatif des pertes de masses obtenues pour le HDPE vierge/fibre de bouleau pour les vitesses de 500 tr/min, 1000 tr/min, et 1500 tr/min	81
4.2.1.5 – Analyse des pertes de couple et du comportement thermique obtenu	82
4.2.1.5.1 – Analyse des pertes de couples	82
4.2.1.5.2 – Analyse des températures	83
4.2.2 – Cas des éprouvettes composites d’engrenages HDPE vierge, HDPE recyclé/fibres de bouleau	85
4.2.2.1 – Analyse de la perte de masse à 500 tr/min	86
4.2.2.2 – Analyse de la perte de masse à 1000 tr/min	88
4.2.2.3 – Analyse de la perte de masse à 1500 tr/min	90
4.2.2.4 – Récapitulatif des pertes de masse obtenues pour le HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau pour les vitesses de 500 tr/min, 1000 tr/min, et 1500 tr/min	92
4.2.2.5 – Analyse des pertes de couple et du comportement thermique obtenu	93
4.2.2.5.1 – Analyse des pertes de couple	93
4.2.2.5.2 – Analyse des températures	94
4.2.3 – Analyse comparative des résultats des essais de thermomécanique	97
4.2.3.1 – Analyse comparative des pertes de masses HDPE vierges/fibre de bouleau – HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau.....	98
4.2.3.2 – Analyse comparative des pourcentages de maintien de couple HDPE vierge/fibre de bouleau – HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau.....	99
4.2.3.3 – Analyse comparative des températures HDPE vierge/fibre de bouleau – HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau.....	100
4.3 – Analyses et interprétations des résultats de tribologie.....	101
4.3.1 – Cas des éprouvettes en rondelles de composites HDPE vierge/fibres de bouleau	102
4.3.1.1 – Analyse de l’évolution de la perte de masse sur des rondelles HDPE vierge/fibres de bouleau pour un taux de glissement de 22,22%	102

4.3.1.2 – Analyse de l'évolution du coefficient de frottement sur des rondelles composites HDPE vierge/fibres de bouleau pour un taux de glissement de 22,22%..	103
4.3.2 – Cas des éprouvettes rondelles en composites HDPE vierges/recyclés/fibre de bouleau	105
4.3.2.1 – Analyse de l'évolution de la perte de masse sur des rondelles de composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau pour un taux de glissement de 22,22%	105
4.3.2.2 – Analyse de l'évolution du coefficient de frottement de masse sur des rondelles HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau pour un taux de glissement de 22,22%.....	108
4.3.3 – Analyse comparative des résultats des essais de tribologie	110
4.3.3.1 – Analyse comparative des résultats d'usure en tribologie : HDPE vierge/fibre de bouleau, et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau	110
4.3.3.2 – Analyse comparative des résultats de coefficient de frottement en tribologie : HDPE vierge/fibres de bouleau, et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau	112
<i>Chapitre 5 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</i>	<i>115</i>
5.1 – Récapitulatif.....	116
5.2 – Conclusion et perspectives	117
<i>Chapitre 6 : BIBLIOGRAPHIE</i>	<i>120</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Photo du bouleau jaune	10
Figure 2.2 : Modèle de transfert de chaleur de l'engrenage utilisé par hooke	17
Figure 2.3 : modes d'endommagement des engrenages en plastique	19
Figure 2.4 : Système tribologique d'engrenage	20
Figure 2.5 : figures présentant quelques modes d'usure.....	22
Figure 2.6 : Diagramme illustratif de concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales	29
Figure 2.7 : Diagramme d'Ishikawa représentatif de la méthodologie du travail de recherche	33
Figure 3.1 : matrice polymère utilisée pour les composites avec du plastique vierge (HDPE)	38
Figure 3.2-a : Texture et morphologie des fibres de bouleau jaune	39
Figure 3.3-b : Séchage des fibres de bouleau Jaune au four	39
Figure 3.4 : MAPE sous forme de granule sphérique	40
Figure 3.5-b : Aperçu des différents pourcentages de fibre de bouleau jaune dans le mélange	41
Figure 3.6-a : Polyéthylène à haute densité.....	41
Figure 3.7 : Machine à granuler H. Dreher Maschinenbau	42
Figure 3.8 : Balance hautement sensible (UQTR)	43
Figure 3.9 : le Brabender Thermotron muni de deux tambours munis de résistances chauffantes incorporées	44
Figure 3.10 : texture générale du polyéthylène HDPE recyclé et granulé (tiré de https://www.alibaba.com/product-detail/HDPE-High-Density-Polyethylene-Recycle-from_128458486.html)	45
Figure 3.11 : Presse à injection ZERES ZE900	48
Figure 3.12 : Schéma de principe d'une presse à injection.....	48
Figure 3.13 : Interface de commande de la presse à injection ZERES ZE900	49
Figure 3.14 : Dimensions normalisées standard des éprouvettes de traction	50
Figure 3.16 : Eprouvettes composite contenant juste le HDPE vierge et du HDPE recyclé ...	50
Figure 3.15 : Eprouvettes composite contenant juste du HDPE vierge	50
Figure 3.17 : Moule A283	51
Figure 3.18 : Thermopresse DAKE.....	51
Figure 3.19 : Exemple d'éprouvette présentant des défauts de disformités majeurs sur le flanc de la denture	53
Figure 3.20 : Vérification de l'épaisseur.....	53
Figure 3.21 : Vérification du diamètre	53
Figure 3.22 : Eprouvettes d'engrenage HDPE vierge.....	54
Figure 3.23 : Eprouvettes d'engrenages HDPE vierge et recyclé	54
Figure 3.24 : Rondelle à base de HDPE vierge et recyclé	55
Figure 3.25 : Rondelles en HDPE vierge	55
Figure 3.26 : Appareil pour les tests de traction	56
Figure 3.27 : Schéma de principe d'un banc d'essai thermomécanique	57
Figure 3.28 : Ordinateur de contrôle et banc d'essai des analyses thermomécanique.....	58
Figure 3.29 : Imagerie thermique obtenue	59
Figure 3.30 : Principe de fonctionnement de la mesur du coefficient de friction	61

Figure 3.31 : Tribomètre TE53 de Plint PARTNER	62
Figure 4.1 : Courbes contraintes - déformations du test de traction pour les composites à base de fibres de bouleau et de polyéthylène vierge	67
Figure 4.2 : évolution du module élastique par rapport aux types de mélanges	68
Figure 4.3 : Evolution de la contrainte de traction par rapport aux types de mélanges	69
Figure 4.4 :Diagramme de variation du module en fonction des pourcentages de HDPE vierge et recyclé.....	70
Figure 4.5 : Diagramme de variation de la contrainte en fonction des pourcentages de HDPE vierge et recyclé.....	71
Figure 4.6 : Comparaison des essais de traction HDPE vierge 100 % et HDPE recyclé 100%	72
Figure 4.7 : Comparaison de modules et de contraintes de traction des composites HDPE vierge/fibres de bouleau et HPDE recyclé/fibres de bouleau à 30% et 35%.....	73
Figure 4.8 : variation de la masse en fonction du couple appliqué, et du pourcentage de fibres	74
Figure 4.9 : Comparaison de modules et de contraintes de traction des composites HDPE vierge 57%/fibres de bouleau 40% et HPDE recyclé6%/fibre de bouleau à 40%	74
Figure 4.10 : variation de la perte masse en fonction de la charge appliquée à 500 tr/min pour les composites HDPE vierges/fibre de bouleau.....	77
Figure 4.11 : variation de la perte masse en fonction de la charge appliquée et du pourcentage de fibres à 1000 tr/min pour les composites HDPE vierges/fibre de bouleau.....	79
Figure 4.12 : Variation de la perte masse en fonction de la charge appliquée et du pourcentage de fibres à 1500 tr/min pour les composites HDPE vierges/fibre de bouleau.....	80
Figure 4.13 : Récapitulatif de l'évolution des pertes de masse pour toutes les valeurs de vitesses de rotation de l'essai	81
Figure 4.14 : Evolution du couple appliqué en fonction de la vitesse de rotation	83
Figure 4.15 : Évolution de la température lors des essais thermomécaniques pour les composites HDPE/fibre de bouleau	84
Figure 4.16 : Évolution des pertes de masse avant et après les essais thermomécaniques à 500 tr/min pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau.....	87
Figure 4.17 : Évolution des pertes de masses avant et après les essais thermomécanique à 1000 tr/min pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau.....	89
Figure 4.18 : Évolution des pertes de masses avant et après les essais thermomécanique à 1500 tr/min pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau.....	91
Figure 4.19 :Récapitulatif de l'évolution des pertes de masse pour toutes les valeurs de vitesses de rotation de l'essai des composites HDPE vierge/HDPE recyclé/fibre de bouleua	92
Figure 4.20 : Evolution du couple appliqué en fonction du pourcentage du mélange et de la vitesse de rotation	94
Figure 4.21 : Evolution de la température en fonction du pourcentage du mélange et de la vitesse de rotation	96
Figure 4.22 : Bilan comparatif des pertes de masse HDPE vierge/fibre de bouleau et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau.....	98
Figure 4.23 : Bilan comparatif des pourcentages de maintien de couple appliqué (composites HDPE vierge/fibres de bouleau et composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau	99

Figure 4.24 : bilan comparatif des températures des essais thermomécaniques HDPE vierges/fibres de bouleau et HDPE vierges/recyclés/fibres de bouleau	100
Figure 4.25 : Variation de la perte masse en fonction du taux de glissement pour les composites HDPE vierge/fibre de bouleau	103
Figure 4.26 : Evolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement pour les composites HDPE vierge/fibre de bouleau	104
Figure 4.27 Récapitulatif de l'évolution des pertes de masse pour tous les taux de glissement de l'essai de tribologie des composites HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau	107
Figure 4.28 : Récapitulatif de l'évolution des pertes de masse pour tous les taux de glissement de l'essai de tribologie des composites HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau	109
Figure 4.29 : Évolution comparative des comportements d'usure des composites HDPE vierge/fibres et HDPE vierge/recyclé/fibre	111
Figure 4.30 : Évolution comparative des comportements des coefficients de frottement des composites HDPE vierge/fibres et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: propriétés physiques et mécaniques de quelques types de fibres	9
Tableau 2.2 : propriété des fibres de bouleau jaune	10
Tableau 2.3 : Propriétés morphologiques du polyéthylène (PE).....	11
Tableau 2.4 : synthèses des principales variables liées aux études et analyse sur les composites	32
Tableau 3.1 : Tableau des pourcentages de mélange de composites HDPE vierge	36
Tableau 3.2 : tableau récapitulatif des différentes compositions de mélanges retenues	37
Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif des types d'éprouvettes classés par pourcentage de fibres	38
Tableau 3.4 : caractéristiques mécaniques et physiques des fibres de bouleau jaune.....	39
Tableau 3.5 : Dimensions moyennes des fibres de bouleau Jane.....	39
Tableau 3.6 : caractéristiques des éprouvettes d'engrenages.....	54
Tableau 3.7 : Caractéristiques dimensionnelles des disques normalisés pour les tests de tribologie	55
Tableau 3.8 : Exemple de plan d'expérience d'engrenages des essais thermomécaniques	59
Tableau 3.9 : Exemple de plan d'expérience pour l'essai de tribologie	63
Tableau 4.1 : Rappel des pourcentages de mélange composites à base de HDPE vierge.....	66
Tableau 4.2 : Rappel pourcentages de mélanges composites vierges et recyclés	66
Tableau 4.3 : Module élastique et contraintes de traction pour les composites fibre de bouleau/HDPE vierge.....	68
Tableau 4.4 : Résultats obtenus par pourcentage de mélange	69
Tableau 4.5 : Pourcentages optimaux de mélange pour les composites HDPE recyclés/fibres de bouleau	75
Tableau 4.6 : Variation de la masse à 500 tr/min	76
Tableau 4.7 : Variation de la masse à 1000 tr/min	78
Tableau 4.8 : Variation de la masse en fonction du couple pour une vitesse de 1500 tr/min .	80
Tableau 4.9 : Pourcentage de couple maintenu à la fin de l'essai pour les composites HDPE vierge/fibres de bouleau	82
Tableau 4.10 : Températures obtenues lors des essais de thermomécaniques HDPE/fibres de bouleau	84
Tableau 4.11 : Résultats des pertes de masses lors des essais de thermomécanique à 500 tr/min pour les composites HDPE vierge /HDPE recyclé/fibres de bouleau	86
Tableau 4.12 : Résultats des pertes de masses lors des essais de thermomécaniques à 1000 tr/min pour les composites HDPE vierge /HDPE recyclé/fibres de bouleau .	88
Tableau 4.13 : Résultats des pertes de masses lors des essais de thermomécanique à 1000 tr/min pour les composites HDPE vierge /HDPE recyclé/fibres de bouleau	90
Tableau 4.14 : Pourcentage de couple maintenu à la fin de l'essai pour les composites HDPE vierge/fibres de bouleau	93
Tableau 4.15 : Températures des engrenages durant les essais pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau.....	95
Tableau 4.16 : Résultats perte de masse pour les essais de tribologie	102
Tableau 4.17 : Coefficient de frottement obtenu après les essais de tribologie pour les composites HDPE vierges/fibres de bouleau	104

Tableau 4.18 : Résultats des pertes de masse obtenues pour les essais de tribologie pour les composites HDPE vierges/recyclés/fibres de bouleau	106
Tableau 4.19 : Résultats des coefficients de frottement obtenus pour les essais de tribologie sur les rondelles composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau	108
Tableau 4.20 : Récapitulatif des meilleurs résultats des essais d'usure HDPE vierge/fibres et HDPE vierge/recyclé/fibres.....	110
Tableau 4.21 : Récapitulatif des meilleurs résultats des essais d'usure : cas HDPE vierge/fibres et HDPE vierge/recyclé/fibres.....	112

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 – Introduction et mise en contexte

Les avancées, découvertes et innovations technico-industrielles du monde actuel sont basées sur l'usage excessif et intensif des ressources naturelles. Ceci a contribué pendant longtemps à la production des déchets plastiques non dégradables. Voulant obtenir une solution efficace, écologique et permanente, plusieurs chercheurs se sont investis dans cette lancée. Depuis les trois dernières années, plusieurs chercheurs de l'Université du Québec à Trois-Rivières, notamment dans le domaine de la recherche sur les matériaux lignocellulosiques, ont travaillé sur ce sujet au travers de multiples essais, ce qui a abouti à la fabrication des échantillons destinés à différents cas d'utilisation avec pour but le remplacement des pièces classiques de machineries, en des pièces ou unités mieux écologiques. D'autres ont étudié le comportement mécanique afin de vérifier la viabilité des échantillons produits. Cela étant, il s'ensuivit une longue liste de tests et résultats obtenus par domaine d'application, tous proposant des caractéristiques spécifiques de matériaux composites liés aux applications industrielles.

De nos jours, la protection de l'environnement est un point important sur lequel plusieurs pays et organisations non gouvernementales mettent l'accent. De plus la fabrication de produits en plastique a ainsi augmenté considérablement au cours des 60 dernières années, passant d'environ 0,5 million de tonnes en 1950 à plus de 260 millions de tonnes aujourd'hui [2]. Presque tous les aspects de la vie quotidienne impliquent des plastiques : dans les transports, les télécommunications, les matériaux d'emballage qui facilitent le transport d'une large gamme de produits alimentaires, etc.

Bien souvent, il est difficile pour les industriels de rester compétitifs, tout en trouvant des solutions aux déchets issus de leurs multiples processus de production malgré leurs multiples efforts et améliorations. Face à cela, nous voulons à travers ce travail produire un matériau composite à fibres naturelles réalisé à partir de ces déchets plastiques qui servira à la fabrication d'engrenages aptes aux applications industrielles. Ceci permettra non seulement de réduire les déchets industriels et les coûts liés à leur traitement ; et aussi, de promouvoir l'environnement.

1.2 – Problématique :

Le choix des matériaux plastiques et composites dans la conception et la fabrication mécanique est commandé par leurs multiples caractéristiques propres reconnues qui procurent un avantage par rapport aux matériaux conventionnels tels que les métaux. Malgré leurs multiples avantages, l'usage intensif des matériaux plastiques et composites pose des problèmes de développement durable par suite de l'épuisement des ressources pétrolières non renouvelables et de la pollution engendrée.

Les polymères sont utilisés dans des applications croissantes en raison de leurs faibles coûts de fabrication. Ils présentent également certains avantages inégalés par les métaux en ce sens que les pièces fabriquées en polymère peuvent être utilisées sans lubrifiant, sont plus légers et moins bruyants.

Les entreprises et les chercheurs sont poussés par les gouvernements et les organismes environnementaux à travers le monde pour développer des matériaux biocomposites alternatifs aux matériaux conventionnels à base de pétrole. Cela, grâce à la sensibilisation du public à l'environnement, au changement climatique et aux ressources limitées en combustibles fossiles.

Par conséquent, l'arrivée permanente au cours des dernières décennies des nouveaux matériaux bioplastiques qui sont constitués de ressources renouvelables a créé des défis difficiles à relever pour valider leurs applications dans les éléments de machines.

Cependant, les polymères sont beaucoup plus sensibles aux influences extérieures telles que la faible résistance à la chaleur, l'intensité et le type de chargement, les radiations et les agents chimiques en plus sont limités à la transmission de mouvement.

La recherche en tribologie est un domaine très important, et il regroupe trois aspects distincts : le frottement, l'usure et la lubrification des éléments de machine

De jour en jour, il existe un grand intérêt pour le développement des biocomposites à matrice thermoplastique recyclable plutôt que thermodurcissable non recyclable, malgré les limites importantes des performances mécaniques des thermoplastiques. Le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) sont les deux thermoplastiques dérivés du pétrole les plus couramment utilisés dans les composites renforcés avec des fibres naturelles. Le polyéthylène PE est un alternatif potentiel des métaux et des matériaux semblables pour des applications techniques

spécifiques telles que les réseaux de transport des fluides sous pression (l'eau potable, le gaz naturel...), les pièces de rechange de fabrication et les éléments de machine.

L'alternative proposée dans ce projet consiste à utiliser un composite de fibres naturelles-CFN- ou un nanocomposite réalisé avec un thermoplastique d'origine bio ou non, mélangé à des fibres naturelles d'origine papetière pour élaborer des engrenages. L'influence du recyclage sur le comportement thermomécanique et sur les performances de tribologie (frottement et usure) n'est pas encore élucidée et ce projet de maîtrise se propose de l'étudier.

1.3 – Question de recherche :

- Comment élaborer un composite de fibre naturelle ?
- Quels pourcentages de mélange fibres naturelles – thermoplastiques faut-il pour que le composite ainsi élaborer puisse présenter les caractéristiques des matériaux d'ingénierie ?
- Comment obtenir un matériau à la fois apte au développement industriel et respectueux de l'environnement ?
- Quels matériaux peuvent le mieux produire ces propriétés de façon optimales une fois mises ensemble ?
- Quelle est l'influence de l'usage de polymère vierge ou de polymère recyclé pour l'élaboration de matériaux composites pour la fabrication d'engrenages ?
- Quelle est l'influence du recyclage sur le comportement thermomécanique des engrenages

1.4 – Objectifs

1.4.1 – Objectif principal :

La fabrication de composite de fibre naturelle (CFN) en incorporant du plastique recyclé d'une part, et du plastique non recyclé d'autre part, pour la fabrication des d'engrenages afin de mettre en exergue les différences fondamentales de leurs propriétés tant physiques mécaniques et tribologiques de ces deux types de composites

1.4.2 – Objectifs secondaires :

- Faire des essais mécaniques en laboratoire pour étudier l'influence du recyclage sur le comportement thermomécanique et en tribologie (frottement et usure) des engrenages en

composite de fibres naturelles pendant leurs fonctionnements afin d'en dégager les pourcentages de mélange adéquat.

- La comparaison des résultats entre le recyclé et le non recyclé.
- Dégager un catalogue qui met en exergue, les pourcentages adéquats de mélange pour la fabrication de matériaux composites dont l'usage permettrait d'obtenir un rendement optimum en fonction des résultats obtenus en laboratoire.
- Évaluer le comportement thermomécanique des composites à base de plastiques recyclés et non recyclés

1.5 – Mesures de performance :

Propriété thermomécanique des engrenages CFN pendant le fonctionnement ; propriétés tribologiques des engrenages ; durée de vie des engrenages CFN ; taux de recyclage des engrenages CFN

1.6 – Concepts :

Comportement des matériaux, impact écologique

1.7 Structure du mémoire

Nous avons parcouru dans cette partie, le contexte de l'étude, défini la problématique et les objectifs de ce travail de recherche. Par la suite notre travail de recherche se fera en quatre étapes structurées de la manière suivante.

La deuxième partie sera consacrée à la revue de la littérature ou recension des écrits sur les matériaux composites, les essais mécaniques, les engrenages, leur formulation, leur fonctionnalité, élaboration, et enfin sur la tribologie des matériaux polymères et leur composite.

Dans la troisième partie, nous présenterons la méthodologie utilisée pour réaliser les objectifs de cette recherche, la méthode de fabrication de différentes formes d'éprouvettes, ainsi que les types de montage (traction, Tribomètre TE53, banc pour engrenages) et les plans des essais expérimentaux effectués.

La quatrième partie concerne la présentation sous la forme de tableaux et graphiques des différents résultats d'essais, suivie par l'analyse et la discussion des résultats importants.

La cinquième et dernière partie se compose de la récapitulation des travaux effectués, de quelques conclusions extraites, et des recommandations et perspectives

CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTERATURE ET DIAGRAMME D'ISHIKAWA

2.1 – Revue de littérature

Dans cette partie, nous nous focaliserons sur les performances tribologiques des polymères et leurs composites. Le chapitre est divisé deux phases importantes.

Dans un premier temps, nous allons nous parcourir les matériaux composites, et les matériaux d'engrenages, leurs caractéristiques et fonctionnalités requises, les constituants qui les composent et leurs interface d'élaboration.

Puis dans un second plan, il sera question de regarder l'aspect tribologique des matériaux composites. Il s'agira des mécanismes de contact en roulement/glisement combiné, le circuit tribologique, les phénomènes thermomécaniques et pertes de couple, et puis les procédures d'essais d'usure, et l'influence de la température sur les performances de tribologie.

Nous effectuerons donc une revue de la littérature des deux divisions ci-dessus, puis nous établirons un cadre théorique permettant de positionner nos travaux de recherche par rapport aux travaux antérieurs traitant la caractérisation des phénomènes de tribologie des éléments de machine au cours de l'utilisation tels que les engrenages

2.1.1 – Présentation des fibres naturelles

Au cours des vingt dernières années, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant de la part du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement. Il se regroupe selon leur origine :

- Fibres d'origine végétale :
 - Fibres agricoles (coton, lin, chanvre, noix de coco, etc....)
 - Fibre de bois (fibres tendres, ou fibres dures)
- Fibres d'origine animale, issues des poils tels que les toisons animales, ou de la soie
- Les fibres d'origine minérale, comme le basalte.

Dans le cadre de notre étude, l'expérience se fera avec des fibres végétales ; en particulier les fibres de bouleau [20, 21], car les composites à fibres de bois restent les plus promoteur pour plusieurs raisons à savoir : une résistance relativement élevée, une faible densité, une stabilité thermique, un faible coût à l'achat.

2.1.1.1 – Structure et propriété physique

Les fibres végétales sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Contrairement aux autres types de fibres, qui possèdent une structure amorphe, la cellulose présente une structure en grande partie cristalline. Selon D. N. SAHEB & J. P. JOG, la cellulose cristalline est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé, soit environ 136 GPa (à titre d'exemple, celui de la fibre de verre est de 75 GPa) [64]. Cette rigidité s'explique par une structure cristalline qui suit un agencement supramoléculaire hélicoïdal très ordonné. Il est important de noter que cette structure moléculaire particulière entraîne, lors d'une élongation des fibres, un couplage torsion/traction qui peut avoir des conséquences sur l'interface, sur la déformation ou sur les mécanismes de rupture du composite [9].

2.1.2 – Propriétés physiques et mécaniques des fibres de bois

Le bois est ainsi loin d'être un matériau homogène, en raison de grandes variations naturelles entre les diverses essences de bois et dans une espèce visée. Même pour les espèces identiques, on note des différences au niveau des propriétés, ceci dépend le plus souvent de l'âge, étant donné l'héritage génétique et l'état de l'environnement. Par conséquent, les propriétés des fibres sont également différentes à la fabrication de la pâte. Les propriétés physiques et mécaniques des fibres naturelles sont présentées dans le Tableau 2. 1.

Tableau 2.1: propriétés physiques et mécaniques de quelques types de fibres [33]

Species	Density g/cm³	Contraintes maximales en tension (MPa)	Young's modulus (Gpa)
Bois	0,3 – 1,1	80 – 200	8 – 15
Chanvre	1,45 – 1,55	300 – 900	25 – 60
Lin	1,54	600 – 2000	12 – 85
Sisal	1,45	350 – 700	9 – 21
Coton	1,5 – 1,6	287 – 597	5,5 – 12,6
Jute	1,44	393 – 773	26,5

2.1.3 – Les fibres de bouleau jaune

Le bouleau jaune est un feuillu à croissance lente qui atteint une taille moyenne supérieure à 20 m. Son écorce à lenticelles visibles (longue signalisation horizontale) est jaunâtre ou bronze au cours des premières étapes de sa vie, et prend des teintes rouge foncé à mesure qu'elle mûrit. En général les lièvres se nourrissent de ses feuilles et des jeunes rameaux pendant l'été et l'hiver. Le bouleau jaune est une des espèces les plus répandues en Amérique du Nord (Figure II. 5), particulièrement au Québec. Il est l'arbre emblématique du Québec.



Figure 2.1 : Photo du bouleau jaune [64]

2.1.4 – Propriétés physiques et géométriques des fibres de bouleau jaune

Les composites à fibres de bois contiennent des fibres d'origines différentes avec diverses propriétés. Le choix des fibres est normalement basé sur les exigences du produit final. Comme nous utilisons dans cette étude les fibres de bouleau, qui sont des bois durs, certaines de leurs propriétés morphologiques sont présentées dans le Tableau 2. 2.

Tableau 2.2 : propriété des fibres de bouleau jaune [9]

Espèce	Densité kg/m ³	Longueur mm	Largeur μm	Épaisseur de paroi μm
Bouleau	740	1.1-1.5	16-22	3.0-3.6

2.2 – Matrices thermoplastiques

Au cours de nos recherches, nous avons pu constater que pour la fabrication d'éprouvettes composites, les thermoplastiques tels que le polypropylène et le polyéthylène sont le plus souvent utilisés. Dans le cadre de notre recherche, nous nous concentrerons sur le polyéthylène étant donné qu'il est directement accessible et fourni dans nos laboratoires.

2.2.1 – Le polyéthylène

Le polyéthylène (PE) est un polymère très répandu dans les applications de génie civil (géomembranes, gaines de ponts à haubans, tuyaux de conduites de gaz ou d'eau, etc.) en raison de son faible coût, de sa facilité de mise en œuvre, de ses propriétés de barrière à l'eau et au gaz naturel, ou encore de sa résistance à l'humidité et aux principaux agents chimiques.

Le polyéthylène à haute densité (HDPE) est un polymère linéaire ne comprenant aucune ramifications courtes et ayant une fraction de branches longues très faible. Ce polymère, de densité comprise entre 0.94 et 0.986 g/cm³ est obtenu à basse pression. En revanche, pour le polyéthylène à basse densité (LDPE), obtenu par polymérisation sous haute pression, les ramifications ont des tailles très dispersées.

L'architecture macromoléculaire et la cristallinité sont probablement les facteurs les plus importants contrôlant les propriétés rhéologiques du polymère à l'état fondu, et ont une influence sur le procédé de mise en forme et les propriétés mécaniques du produit final.

Tableau 2.3 : Propriétés morphologiques du polyéthylène (PE) [9, 35, 33]

Produits	Densité g/cm ³	Cristallinité %
LDPE	0.916-0.925	35-55
MDPE	0.926-0.940	70-80
HDPE	0.942-0.965	85
PP	0.890-0.905	50-60

2.3 – Composite polyéthylène/bouleau

Un composite est un matériau qui vise à combiner les propriétés de ses composants (généralement une matrice polymérique et un renfort) pour permettre d'en améliorer certaines caractéristiques comme la résistance à la rupture, ou la rigidité pour des composites à usages mécaniques.

Bien que l'objectif soit l'amélioration des propriétés, par association de composés qui présentent de faibles caractéristiques s'ils sont étudiés séparément, cette association présente aussi certains aspects bénéfiques. On peut citer par exemple, d'une faible absorption d'eau, une faible tenue thermique, de 200 à 300 °C.

Par ailleurs, les effets des fibres sur les propriétés mécaniques d'un composite dépendent de leur morphologie, du taux de fibres, et du traitement chimique (agent de couplage) subi par les fibres. Le traitement chimique est très important, car il permet de créer une adhésion entre fibres et matrice. Parmi les différents types de traitements qui existent, le traitement à partir des polymères fonctionnalisés (agent de couplage) est utilisé dans beaucoup de recherches, notamment ceux au maléate de polypropylène (MAPP) et au maléate de polyéthylène (MAPE).

D'une manière générale, avec ou sans traitement des fibres de bois, on note une évolution linéaire du module élastique en traction et en flexion en fonction du taux de fibres, comme le montrent les travaux de A Bravo, L Toubal, D Koffi, F Erchiqui (2018) [3, 6, 7] ; de D. Koffi, A. Bravo, L Toubal, F Erchiqui. (2016) [65] ; de Gu et Kokta. [22, 23, 24] et de Xue et Veazie. [25]. Mais pour certains composites, la non-adhésion entre fibres et matrice engendre une stagnation du module élastique, quel que soit le taux de fibres, comme Gu et al. [24] le montrent dans leurs travaux pour un composite de polypropylène chargé par des fibres de tremble. D'après les travaux de Xue et al. sur un composite polypropylène/tremble formulé par injection, les modules élastiques en traction et en flexion atteignent 6 GPa pour le composite à 50 % de fibres. Des résultats similaires ont été obtenus avec l'utilisation du maléate de polyéthylène (MAPE) comme agents de couplage pour un composite à matrice polyéthylène renforcé par des fibres de tremble [27]

2.3.1 – Élaboration des matériaux composites pour engrenages

De nos jours il existe une multitude de procédés pour la fabrication des composites. D'une manière générale, la fabrication des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles passe par plusieurs étapes avant de prendre la forme de la pièce finale. Cela étant dit, on peut regrouper ces étapes en trois grandes opérations qui sont :

- Le mélange des renforts avec le système résineux pour permettre une distribution homogène des composantes dans la matrice et de garantir l'homogénéité des propriétés du matériau indispensable à de bonnes performances.
- La mise en forme à la géométrie de la pièce par le processus de thermocompression ou par injection. Toutefois le moulage par injection est un procédé très répandu dans l'élaboration des éprouvettes composites.
- Le durcissement de ou la polycondensation. En général pour des matrices thermoplastiques on procède par simple refroidissement.

Le cycle de mélange doit être adapté aux matières premières utilisées suivant leurs morphologies ; les composantes sont introduites dans un ordre bien déterminé, l'ordre et les quantités introduites des produits sont généralement bien choisis afin de minimiser la ségrégation des matières due à leur grande différence de densité apparente.

2.4 – Module élastique des composites thermoplastiques à fibres courtes

D'une manière générale, les composites sont définis comme des matériaux hétérogènes. Toutefois, pour la détermination des propriétés, on considère un volume idéalisé représentatif appelé VER en considérant le matériau comme étant continu. [01]

La démarche générale consiste à déterminer les champs de contraintes et de déformation au sein du VER ; et delà il devient possible de calculer la contrainte moyenne $\bar{\sigma}$ et la déformation moyenne $\bar{\epsilon}$ au sein de l'élément de volume suivant les formules :

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{V} \int \sigma_i dV \quad \bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{V} \int \varepsilon_i dV \quad (2.1) \text{ et } (2.2)$$

Avec i allant de 1 à 6

De cette généralité ont été conçus les modèles les plus utilisés basés sur des hypothèses simplificatrices du comportement mécanique dans le domaine des composites. Il s'agit par exemple des modèles de Halpin-Tsai, de Tsai-Pagano, de Lavengooft-Goettler et autres.

Pour nos travaux nous nous sommes focalisés sur le modèle de Halpin-Tsai, car il donnait une meilleure approche pour les tests à effectuer

2.4.1 – Le modèle de Halpin-Tsai

Le modèle de Halpin-Tsai est un modèle semi-empirique qui prédit le module élastique d'un composite en fonction du module élastique des composantes du matériau (fibre matrice), du taux de fibre du matériau, et de l'aspect de forme des fibres (longueur/diamètre). L'équation de prédiction du module des composites de fibres courtes d'après Halpin-Tsai est la suivante :

$$E_c = E_m \frac{(1+\xi\eta v_f)}{(1-\eta v_f)} \quad (2.3)$$

Avec :

$$\eta = E_m \frac{(E_f/E_m)-1}{(E_f/E_m)-\xi} \quad (2.4)$$

Et

E_m = module élastique du plastique

E_f = module élastique de la fibre

$\xi = 2 \frac{L}{D}$ = Paramètre intrinsèque fonction de la géométrie de la fibre

L = Longueur de la fibre

D = Diamètre des fibres

2.5 – Comportement thermique des engrenages en thermoplastique et composites

Le comportement des thermoplastiques est fortement influencé par la température. Il est donc nécessaire de pouvoir prédire avec précision la température des engrenages en fonction des conditions de fonctionnement.

Dans le cas des engrenages en acier, la chaleur générée est dissipée la plupart du temps par le lubrifiant. Dans le cas d'engrenages en thermoplastique, qui fonctionnent en général sans lubrifiant et ont une mauvaise conduction thermique, la chaleur se dissipe moins facilement et provoque une élévation non négligeable de la température de service. La conséquence directe est une augmentation plus rapide de l'usure des dentures et de l'engrenage jusqu'à rupture sous plus hautes sollicitations.

Le transfert de chaleur dans le corps du pignon vers l'arbre support se fait par conduction, celui avec l'air environnant par convection. Plusieurs auteurs ont étudié le comportement thermique des engrenages en polymère et leurs performances. Des études expérimentales ont été conduites par Agbelenko Koffi, Demagna Koffi, Lotfi Toubal. (2020) [1] ; A Bravo, L Toubal, D Koffi, F Erchiqui (2018)[3], A Bravo, L Toubal, D Koffi, F Erchiqui. (2015) [6] , A Bravo, D Koffi, L Toubal, F Erchiqui. (2015). [8], et Mao et al.[54]. Elles ont montré une forte relation entre les conditions de fonctionnement, la géométrie de l'engrenage et l'échauffement.

À partir des résultats expérimentaux, plusieurs modèles théoriques basés sur un bilan global des sources de chaleur et des pertes ont été développés. A Bravo et al.[6], Hooke et al.[42], Mao et al.[45], et Koffi et al. [65] ont proposé des modèles prédisant la température de corps « body temperature » ou celle au point de contact d'un engrenage en fonctionnement. La plupart des études montrent que les pertes de puissance et les échauffements dans les engrenages en thermoplastique, sont essentiellement dus à trois phénomènes : le piégeage de l'air entre les dents, le frottement au contact et l'échauffement viscoélastique interne.

2.5.1 – Modèle thermique : modèle de Block

Block [84] a établi un modèle qui estime la température « flash » d'une dent d'un engrenage soumise à une pression de contact, de type hertzienne. La température flashe ΔT_f , provient de la dissipation de chaleur au niveau du contact qui résulte de la combinaison du

frottement μ , du glissement $V1^{1/2} - V2^{1/2}$, ainsi que des caractéristiques géométriques de l'engrenage. Cette température reste cependant très difficile à observer comme le montrent les travaux de E. Letzelter [97].

$$\Delta T_f = 1.11 * \mu * F \left(\frac{V_1^{\frac{1}{2}} - V_2^{\frac{1}{2}}}{b\sqrt{2*k*\rho*c*a}} \right) \quad (2.5)$$

Où :

μ est le coefficient de frottement,

F est la force normale appliquée sur la dent,

b est la largeur de denture,

V1 la vitesse de glissement du pignon,

V2 la vitesse de glissement de la roue,

k la conductivité thermique du matériau,

c, la chaleur spécifique du matériau,

ρ la densité du matériau

a est la moitié de la largeur de contact.

2.5.2 – Modèle thermique : modèle de Hooke

Contrairement au modèle de Block où toute l'énergie de friction est dissipée dans le contact, Hooke et al. [98] proposent, au début des années 90, un équilibre entre l'énergie générée dans le contact et l'air piégé entre les dents. La température du fluide pompé est ensuite supposée égale à la température de volume de l'engrenage. La Figure 2.2 présente le principe utilisé par Hooke pour établir son modèle.

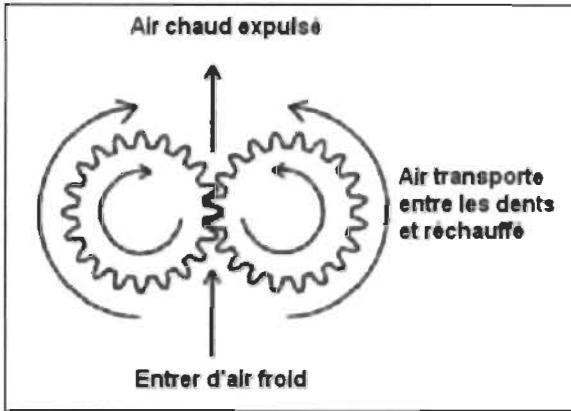


Figure 2.2 : Modèle de transfert de chaleur de l'engrenage utilisé par Hooke [66]

De ce modèle, Hooke a formulé trois équations respectivement pour la détermination du fluide pompé pour chaque tour ; la détermination de la chaleur générée dans un engrenage et la détermination de la puissance moyenne perdue par frottement pour une seule dent en contact. Ainsi on a :

$$V = 2 * \pi * b(tr^2 + r_1^2) \quad (2.6)$$

$$\Delta H = \omega * V * \Delta T_v * c * \rho \quad (2.7)$$

$$\Delta H = \mu * F * V_S \quad \text{et} \quad V_S = \frac{\pi * \omega * r_b}{z} = \frac{\pi * \omega * C}{Z F} \quad (2.8)$$

et (2.9)

Avec :

b, est la largeur de denture,

r, le rayon de tête,

r_1 le rayon au cercle primitif,

ω , la vitesse de rotation,

V, le volume de fluide pompé,

ΔT_v , la température du volume,

P, la densité de l'air et c, la chaleur spécifique de l'air.

M, est le coefficient de frottement,

F, la charge appliquée

V_s, la vitesse de glissement moyenne,
 r_b, le rayon de base de la roue,
 Z, le nombre de dents de la roue et C le couple appliqué.

À partir des trois dernières relations, Hooke a pu établir un modèle pour estimer la température du volume ΔT_v d'un engrenage en polymère supposée égale à celle du gaz pompé

$$V_s = \frac{0.625 * \mu * C}{C_p * \rho * Z * b * (r^2 + r_1^2)} \quad (2.10)$$

Ce modèle suppose que la température de volume est proportionnelle au couple. Cependant, Hooke informe que ce modèle simple pour les transferts de chaleur nécessite encore quelques développements, mais il fournit déjà une bonne base pour la prédiction de la température de volume des engrenages en polymère.

2.6 – Tribologie des matériaux d'engrenages

La tribologie ou étude des phénomènes liés à l'usure est un phénomène qui est présent dans notre vie quotidienne. Depuis l'âge de pierre, l'homme a su produire le feu par frottement de deux pierres l'une contre l'autre et depuis le frottement entre deux surfaces a provoqué une sorte de révolution. Ce phénomène est devenu aujourd'hui une discipline complète connue sous le nom de tribologie. Pendant le processus d'engrènement, le frottement et l'usure sont dominés par la formation d'un troisième corps qui s'intercale dans le contact entre les dents de l'engrenage mené et l'engrenage menant, c'est Maurice Godet qui a introduit la notion de tribologie à trois corps pour la première fois dans les années 70 [28], puis dans les années 80 Yves Berthier a enrichi cette discipline par les notions de mécanismes d'accommodation de vitesse, de circuit tribologique et de triplet tribologique [29].

Les recherches et les théories de tribologie, ainsi que les processus et les outils développés dans le domaine des engrenages ont pour objectif de produire une qualité de surface respectant les exigences et la complexité de contact à l'engrènement.

Après les exigences de forme, de géométrie et de dimension des dents d'engrenage, la rugosité des surfaces de contact fait souvent partie des critères qui permettent de définir la qualité de transmission. Selon une étude récente du CETIM (Centre technique des industries mécaniques) en France, 80 % des avaries des pièces mécaniques commencent en surface, l'étude de glissement des surfaces en contact fait actuellement l'objet d'études poussée.

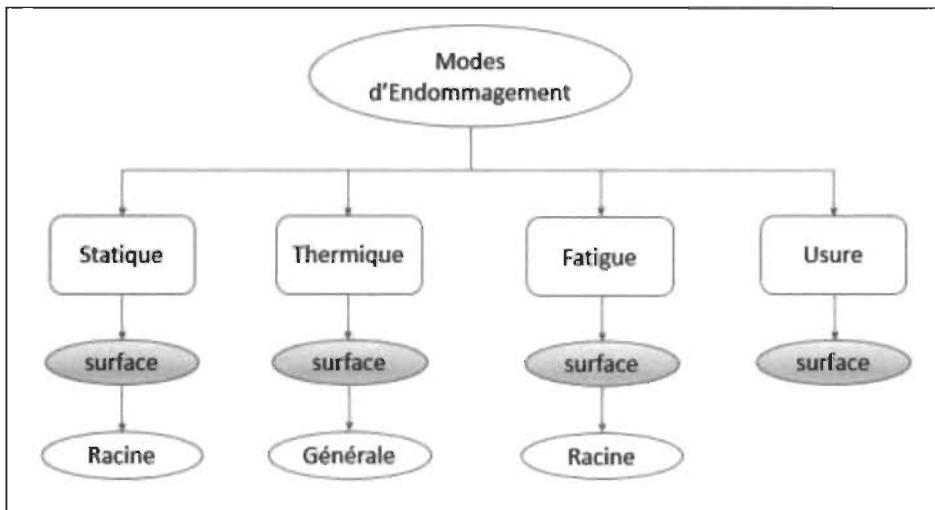


Figure 2.3 : modes d'endommagement des engrenages en plastique [48]

Donc, la qualité des surfaces des dents d'engrenage en plastique est une priorité absolue, car toute imperfection peut être à l'origine d'usure dans ces composants critiques.

Dans la suite ce chapitre, nous allons présenter quelques mécanismes de frottement et d'usure induits lors de l'engrènement ainsi que leur couplage avec les phénomènes thermomécaniques et pertes de couple. Nous terminerons par des exemples concrets de revues scientifiques.

2.6.1 – Circuit tribologique

D'une manière générale, un système tribologique est influencé par les facteurs chimiques, mécaniques et énergétiques. Le contact entre dentures se caractérise par une géométrie non conforme des surfaces qui conduit à des aires de contact faibles, des déformations importantes des surfaces et des pressions de contact élevées.

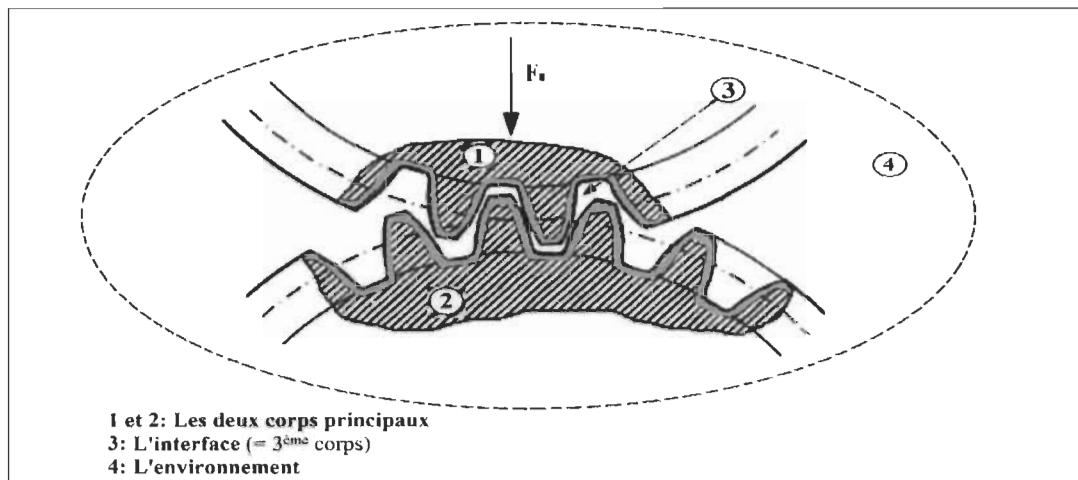


Figure 2.4 : Système tribologique d'engrenage [46]

Le contact entre deux surfaces peut produire des débris du fait des aspérités des surfaces. Si les débris restent piégés dans le contact, le contact passe de deux à trois corps (Figure 2.4). Ces débris définissent le troisième corps, par opposition aux deux premiers corps du contact. Il apparaît intéressant de préciser les définitions des premier et troisième corps :

Par premiers corps ou encore les deux corps principaux on entend, les pièces ou éléments qui bordent le contact. Ils interviennent par leur géométrie et leurs propriétés thermoélastiques définissant les zones élémentaires de contact. Ils réagissent aux sollicitations de contact soit par changements de phases et/ou de structures qui conduisent par fragmentation au détachement de particules : ce sont les Transformations Tribologiques superficielles (TTS) induites par la pression et les déformations locales ; soit par fissuration, ou par l'abrasion ou écaillage qui apparaît dans un second temps.

Le troisième corps quant à lui représente le volume de matière présent entre les premiers corps. C'est un opérateur de transmission de charge accommodant la différence de vitesse des premiers corps. Il est dit naturel lorsqu'il est issu ou se forme sur au moins un des deux premiers

corps et artificiel lorsqu'il est apporté dans le contact (lubrification solide ou fluide). Toutefois un troisième corps naturel implique une période de formation par détachement de particules des premiers corps [46].

2.6.2 – Les frottements

Le frottement peut se définir comme la résistance au mouvement de glissement d'une surface par rapport à une autre, causée par les aspérités. La résistance au glissement (frottement) est due d'une part aux irrégularités des surfaces en contact, ce qui conduit à un enchevêtrement des rugosités, d'où la nécessité d'un effort tangentiel pour franchir ou creuser ces aspérités.

D'une autre part, l'étendue réelle des surfaces en contact étant réduite à quelques zones où la pression est très forte, il en résulte une déformation importante. La force de traction cisaille alors les zones de jonction qui se sont formées, ce qui conduit à l'arrachement de particule et élévation de température. La perte d'énergie et la chaleur générée par la résistance au frottement augmentent le taux d'usure et influencent directement la durée de vie des pièces.

2.6.2.1 – *Le coefficient de frottement statique*

Encore noté μ_s , le coefficient de frottement statique se définit comme la force agissant sur un objet immobile par rapport à la surface de contact.

2.6.2.2 – *Le coefficient de frottement dynamique*

Noté μ_k , c'est la force de frottement agissant sur un objet en mouvement par rapport à la surface de contact.

Les coefficients de frottement sont indépendants de la vitesse de déplacement et de l'étendue des surfaces en contact. Cependant, il dépend de la structure interne, de la nature des matériaux en contact, de l'état des surfaces (rugosités) frottant et de l'environnement de fonctionnement.

2.6.3 – L'usure

L'usure est la perte de matière au niveau de l'une ou des deux surfaces, la caractérisation des interactions tribologiques et des phénomènes liés au frottement entre les surfaces en contact apparaît comme un enjeu majeur pour la compréhension des mécanismes d'usure l'expérience montre que, pour faire glisser deux corps solides l'un sur l'autre, il faut exercer une force dans la direction du mouvement relatif dit force de frottement ; en outre, l'observation des corps après un mouvement relatif important révèle le plus souvent que leur volume a diminué dans la zone de contact : c'est le phénomène d'usure.

Usure et frottement sont donc deux phénomènes étroitement liés, étudiés par la tribologie, mais leurs relations mutuelles sont loin d'être toutes comprises actuellement et dépendent fortement, et souvent de manière peu intuitive, des conditions de contact (pression, vitesse relative...), de l'environnement (température, humidité...) et des matériaux impliqués.

Ainsi le changement d'un des deux matériaux peut amener une baisse du frottement, mais une augmentation de l'usure. Ces deux phénomènes sont très importants sur le plan pratique. Dans le cas, par exemple d'un palier sec, le frottement conditionne l'énergie dissipée dans le contact et donc les pertes énergétiques dans le palier ; l'usure détermine la durée de vie du palier

La figure ci-dessous présente quelques formes simplifiées représentatives des phénomènes frottements et d'usure

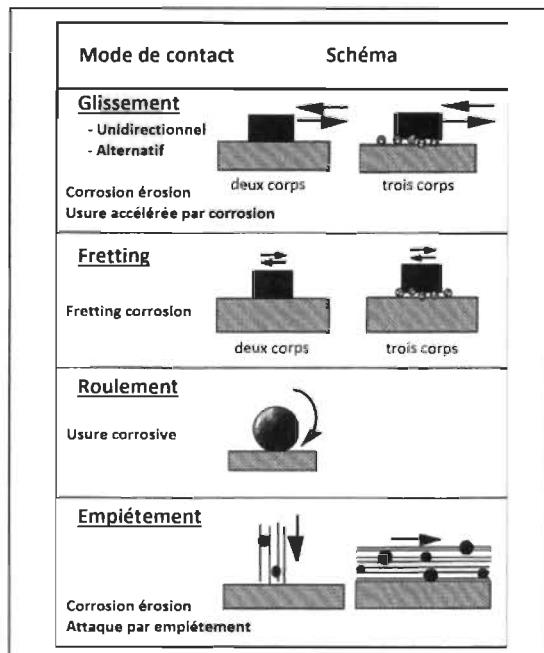


Figure 2.5 : figures présentant quelques modes d'usure [40]

2.6.3.1 – Usure adhésive ou glissement

Lorsque deux surfaces en contact sont en glissement, leurs aspérités (ou défauts de surfaces) opposées de hauteur maximale entrent en contact. Au fur et à mesure que la charge augmente, les nouvelles paires d'aspérités de moindre hauteur entrent en contact pour former des jonctions individuelles. La surface totale de ces jonctions est appelée zone de contact réel ; les phénomènes d'adhésion peuvent se produire au niveau de chaque jonction et créer une liaison adhésive.

Si, le mouvement se poursuit, la jonction est soumise à un cisaillement et deux situations peuvent alors exister :

- **l'interface est moins solide que les pièces** : dans ce cas les jonctions se cisaillent par rupture adhésive, l'usure est modérée ou quasi nulle.
- **l'interface est plus solide qu'une des pièces** : il se produit une rupture cohésive, usure sévère, voire grippage. L'interface se fixe sur la pièce la plus résistante ou se détache sous forme des particules qui, écrouies et oxydées, peuvent contribuer à l'adhésion pour les matériaux métalliques.

2.6.3.2 – Usure par fretting

Unidirectionnel ou alternatif. Le « fretting » est un type spécial de contact tribologique dans lequel les surfaces en contact sont soumises à des mouvements oscillatoires d'amplitude suffisamment faible pour ne générer qu'un frottement du contact partiel. L'impact des particules peut se traduire par l'attaque combinée, mécanique et chimique, du matériau.

Dans certains cas, des fissures orientées perpendiculairement à la surface de frottement peuvent apparaître à l'extérieur du contact pour un nombre de cycles élevé aussi bien pour des matériaux ductiles que fragiles (fatigue de surface).

Si les débris d'usures générés dans l'interface ne sont pas évacués rapidement à l'extérieur, ils peuvent créer des fonctionnements ou des dégradations particulières (difficulté lors du démontage des assemblages dus au colmatage des interfaces, usure abrasive...).

L'usure par fretting se rencontre dans de nombreux systèmes mécaniques et assemblages en construction mécanique. L'influence du phénomène sur l'abaissement de la tenue à la fatigue (fretting – fatigue) est particulièrement bien illustrée dans le cas des câbles où il peut être

responsable de ruptures prématuées (câbles de ponts, de téléphériques, de renfort de poids lourd...) [31].

2.6.3.3 – Usure érosive

L'usure par érosion résulte de l'enlèvement de matière par un fluide chargé de particules en contact avec la surface d'un matériau ; elle conduit à la création d'impacts et de rayures sur les surfaces. Dans les applications mécaniques, ce type d'usure intervient notamment sur les systèmes soumis à un flux de produits liquides ou pâteux chargés d'abrasif, et circulant à vitesse élevée.

2.6.4 – Les mécanismes d'usure et de dégradation de surfaces

Des essais empiriques effectués dans le cadre de la modélisation du comportement des engrenages plastiques, il en ressort que la charge maximale des engrenages en plastique dépend fortement de la taille et de la position de contact. L'usure regroupement non linéaire de phénomènes complexes tous étroitement lié aux conditions de contact (pression, vitesse relative...), de l'environnement (température, humidité...) et des matériaux impliqués. Le changement d'un des deux matériaux peut amener une baisse du frottement des sollicitations (charges, température...). Le phénomène d'usure d'une pièce peut se regrouper en trois grandes étapes

- Le rodage : avec une vitesse d'usure très importante au début et qui diminue progressivement par la suite.
- Le fonctionnement normal : état quasi statique de l'usure.
- Le vieillissement : un accroissement de la vitesse d'usure jusqu'à la rupture de la pièce

2.6.5 – Procédures d'essais de frottement et d'usure d'engrenages

La vitesse ou le taux d'usure des engrenages est un paramètre important qui doit être contrôlé afin d'améliorer la tenue en service de ces matériaux et la prévention d'entretien pour éviter les accidents catastrophiques causés par la détérioration de l'engrenage par la fatigue d'usure pendant le service.

Les engrenages en polymères et en composites de polymères se brisent pendant le fonctionnement de plusieurs manières, notamment l'usure, la défaillance thermique, la fatigue à la racine et la ligne de tangage. Afin de tirer des conclusions significatives concernant les performances d'un matériau utilisé pour les engrenages en fonctionnement à sec, il est important de comprendre ses caractéristiques d'usure. De nombreuses méthodes ont été conçues pour mesurer les taux d'usure d'une large gamme de matériaux, en utilisant un certain nombre de géométries de contact et de configurations de test.

Ces tests incluent des conditions de contact conformes et non conformes. Cependant, la grande majorité de ces tests expose l'éprouvette à un simple glissement, qu'il soit linéaire, alternatif ou rotatif. Le mouvement trouvé dans le contact des dents d'engrenage est une combinaison de glissement et de roulement dans des proportions variables lorsque l'angle d'attaque change. La charge appliquée change également pendant le cycle d'engrènement, car elle est partagée par une nouvelle dent entrant dans l'engrènement, puis relâchée par une dent sortant d'engrènement. Ce cycle entraîne une charge normale maximale sur une plage d'angles d'attaque autour du point de tangage, la magnitude et la durée de cette charge maximale étant fonction de la géométrie [3].

Il est donc dangereux d'utiliser les données provenant de simples tests d'usure, tel que le test broche sur disque, comme prédicteurs des performances relatives des matériaux d'engrenage proposés. Il est encore plus dangereux de prévoir les taux d'usure des matériaux utilisés dans une géométrie d'engrenage particulière et soumis à des conditions de fonctionnement particulières à partir de telles données générales.

Un moyen simple d'éviter ces écueils est de produire des engrenages constitués du matériau qui vous intéresse et de les tester dans des conditions de fonctionnement se rapprochant de celles attendues en service. Cependant, cette approche, tout en incluant tous les aspects de la performance matérielle intéressant le concepteur d'engrenages, superpose ces effets les uns aux autres, limitant ainsi la compréhension de chacun.

La simulation des engrenages ne peut jamais être vraiment représentative, car les changements de vitesse de glissement, la flexibilité des dents et les différences dans les conditions thermiques rendent les conditions de contact très différentes. De plus, les taux de glissement dans les essais sur disque double tendent à être limités à environ 30%, alors que les taux de glissement supérieurs à 30% se retrouvent tout au long du cycle d'engrènement des engrenages. Néanmoins, les tests sur deux disques fournissent des informations fondamentales

sur le comportement des matériaux lors de roulement / glissement sous contact non conforme. Elles doivent être considérées comme complétant les informations appliquées issues des essais à engrenages directs et contribuant à une compréhension plus fondamentale de la tribologie des polymères dans des conditions de roulement / glissement [32-34].

2.6.6 – Ouvrages et études consultés

Au cours de notre recherche sur les différents travaux effectués mettant l'accent sur l'un des aspects de la problématique et/ou objectifs de notre étude, nous avons eu à parcourir plusieurs ouvrages. Pour certains, il était question de regarder dans son intégralité structurelle, les paramètres nécessaires d'optimisation des matériaux composites, à savoir, le type de fibre nature, la morphologie des fibres (courte ou longue), le type de maillage (filaire ou contigu), et le type thermodurcissable plastique.

Pour d'autre en revanche, il a été question de fabrication d'éprouvettes, de test ou essais mécaniques (traction, compression flexion) et de simulation, afin de se focaliser sur les caractéristiques intrinsèques des éprouvettes telles que la dureté, la résistivité au choc en fonction des pourcentages de dosages. Par ailleurs, quelques auteurs se sont concentrés sur les études tribologiques, et thermomécaniques, afin d'obtenir un modèle de prédiction et de prévision de l'usure et de détérioration des engrenages composites.

➤ Dans une étude récente publiée en Novembre 2020, Agbelenko Koffi, Demagna Koffi, Lotfi Toubal. [1] ont étudié les propriétés mécaniques sur des échantillons de composites HDPE vierges/ fibres de bouleau produits par injection. Ils ont étudié leur capacité à résister aux chocs grâce aux tests de résilience qui sont des tests d'impact izod, des tests d'impact de chute. Puis ils ont aussi étudié la dureté du matériau. Par ailleurs des essais de traction et des mesures d'excitation d'impulsion ont été faits pour savoir s'il y a une amélioration des propriétés mécaniques en raison des processus de fabrication utilisés.

A l'issue de leur étude, ils ont observé que l'énergie absorbée maximale est atteinte composite HDPE/ fibres de bouleau à 20 % de fibres. Selon les tests d'impact de poids de chute les composite HDPE/fibres de bouleau de teneur en fibres de 20% constituait le matériau le plus résistant et composite avec 40% de teneur en fibres était le moins résistant.

Les résultats du test d'impact Izod montrent que la force d'impact des composites HDPE/fibres de bouleau augmente avec une proportion croissante de fibres.

Ils ont constaté que pour les tests de dureté, une hausse de 50,6 à 73,6 de dureté respectivement allant des composite de 0% de fibres, aux composites HDPE/fibres de bouleau contenant 40% de fibres

Pour la force et le module élastique ils ont constaté une amélioration des propriété respectivement de 19,7% et 27,2% pour les composites HDPE/fibres de bouleau contenant 40% de fibres.

➤ Dans une autre étude publiée en 2016 ; D Koffi, A Bravo, L Toubal, F Erchiqui [65] compare divers trous de refroidissement pour des configurations d'engrenages en plastique et propose de nouveaux trous de refroidissement à travers des simulations thermiques et mécaniques prenant en compte des aspects spécifiques du maillage des engrenages en plastique. L'objectif principal de leur étude était de vérifier les meilleures méthodes pour réduire les dommages thermiques à travers les trous de refroidissement car ils ont remarqué que Le plein potentiel de l'utilisation des engrenages en plastique est limité non seulement par de mauvaises propriétés mécaniques, mais également par des limites de température tout aussi médiocres et de mauvaises propriétés de conduction thermique.

Les résultats qu'ils ont obtenus leurs ont permis d'établir le meilleur compromis entre la réduction de température et les propriétés mécaniques de la nouvelle géométrie de la dent. Ces résultats indiquent également que les simples variations des trous de refroidissement proposés peuvent améliorer les performances des dents.

➤ K. Mao [46] ont proposé une nouvelle méthode de conception d'engrenages en composite polymère basé sur le lien entre le taux d'usure et la température des surfaces de contact. L'étude expérimentale a été effectuée avec un banc d'essai à engrenages conçu pour mesurer le couple et l'usure de la surface d'engrenage en permanence dans des conditions de charge constante permettant d'enregistrer le nombre de cycles avant la défaillance. Des engrenages en acetal et des engrenages en composite contiennent 55% de nylon, 30 % fibres de verre et 15 % de PTFE ont été examinés dans cette étude, tous les engrenages ont été moulés

par injection. Les chercheurs ont effectué les essais à la température non contrôlée de l'air ambiant à trois vitesses de rotation différentes, à savoir : 500, 1000 et 1500 tr/min, une plage de couple de 7 à 16.1 Nm a été appliquée sur les engrenages en acétal et une plage de 5 à 35 Nm a été appliquée sur les engrenages en composites.

Les résultats de cette étude ont montré que l'usure est la cause principale de défaillance des engrenages en acétal et qu'il existe des charges critiques pour chaque vitesse de rotation. Ces charges critiques provoquent des températures trop élevées, ce qui accélère l'usure et mène la défaillance d'engrenage par pliage brutal des dents. Les auteurs ont établi une relation générale entre la température de surface des engrenages et la capacité de charge pour prédire l'élévation de température du corps de l'engrenage au cours d'engrènement.

L'élévation de la température est donnée par la relation suivante

$$\theta_b = \frac{0.625 * \mu * T}{c * \rho * Z * b * (r_a^2 - r^2)}$$

(2.11)

Avec

T : le couple

ρ : la masse volumique

c : la chaleur spécifique

Z : nombre de dents

μ : coefficient de frottement

b : la largeur de la dent

r : le rayon de référence

r_a : le rayon extérieur

en se basant sur les résultats de la figure 2-6, les auteurs ont montré l'accord étroit entre la théorie et l'expérience de vitesses allant jusqu'à 1500 tr / min pour les engrenages en acétal de forme de dent standard, module 2 mm, 30 dents et largeur de face 17 mm

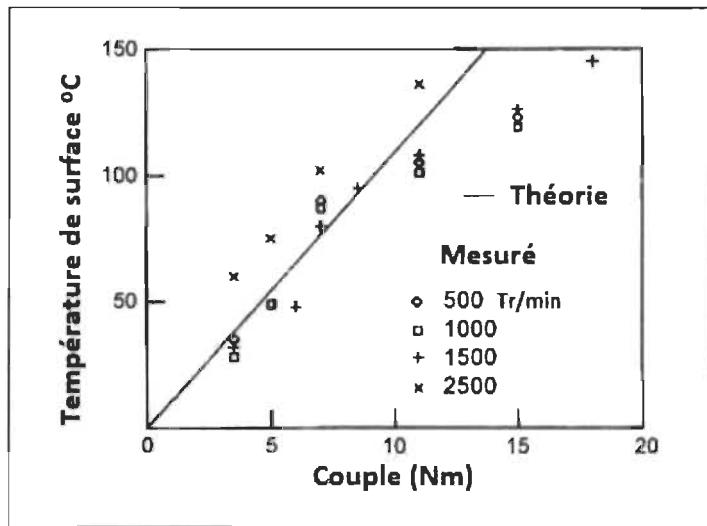


Figure 2.6 : Diagramme illustratif de concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales [54]

Les chercheurs ont expliqué l'augmentation des températures au-dessus de 1500 tr / min par le fait que les températures dans les poches dentées n'ont pas le temps de se stabiliser pendant un seul tour de l'engrenage. Ceci est cohérent avec l'observation que la différence de température entre les flancs des dents en contact et sans contact augmente avec la vitesse.

➤ Dans une autre étude récente, P. K. Singh et al [63] ont étudié le comportement thermique et l'usure des engrenages cylindriques fabriqués par injection à base de polymères sur trois différents types de matériaux spécifiques, à savoir : l'Acrylonitrile butadiène styrène ABS, POM et le HDPE. Les engrenages en polymère sont testés contre des engrenages métalliques identiques en acier (AISI 1040) à quatre vitesses de rotation différentes soient : 600 tr/min, 800 tr/min, 1000 tr/min, et 1200 tr/min et des valeurs de couple de 0.8 Nm, 1.2 Nm, 1.6 N met 2 Nm.

Les essais de fonctionnement réel simulé des engrenages ont duré jusqu'à 1.2×10^5 cycles. Les chercheurs ont utilisé un capteur de température infrarouge sans contact (OMEGA, OS 100EV2) avec une précision de $\pm 1\%$ pour enregistrer la variation de la température de surface de contact en continu au cours de test. Les températures d'équilibre mesurées dans cette étude sont comparées avec les températures d'équilibre prédites calculées en utilisant le modèle de Mao [5] où l'élévation de la température est obtenue par la relation (2.3) ci-dessus.

La perte de masse Δm des engrenages testés a été mesurée en pesant l'éprouvette testée avant et après le test avec un appareil de pesage d'une précision de 0.01 mg. Ensuite les chercheurs ont calculé les taux d'usure spécifiques avec la relation suivante :

$$w_s = \frac{w_v}{2*Z*m*b*N_T} \quad (2.12)$$

Avec:

W_s : volume d'usure

Z: nombre de dents d'engrenage

m : le module

b : la largeur de la dent

N_T :le nombre total de tours

Et

$$w_v = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (2.13)$$

Δm :la variation de poids observée avant et après le test

P : la masse volumique du matériau.

Les résultats de cette étude ont montré que l'augmentation de la température de surface est maximale pour le POM (polyoxyméthylène) et minimale pour le PEHD (polyéthylène à haute densité) à tous les niveaux de couple et le taux d'usure spécifique est maximal pour l'ABS et le minimum pour le POM.

Les essais ont révélé que le taux d'usure spécifique des engrenages en polymère augmente avec le couple, mais diminue avec la vitesse de rotation ; les auteurs ont estimé que le couple appliqué sur l'engrenage contribue à l'augmentation de température de 7 à 8 fois plus par rapport à la contribution de la vitesse de rotation. Les auteures ont expliqué qu'une vitesse de rotation plus élevée augmente la vitesse de déformation et cela améliore la résistance à l'usure du matériau de l'engrenage.

La comparaison des valeurs d'élévation de température enregistrée expérimentalement et les valeurs obtenues théoriquement avec le modèle de Mao montre un meilleur accord dans les cas des engrenages en ABS, où les auteurs de ce travail ont constaté 8% d'écart avec ABS par rapport à 10% et 11% dans les cas d'engrenages en HDPE et en POM respectivement

➤ Les auteurs M. Kalin et Kupec [20] ont mené une étude de fonctionnement réel simulé des engrenages en polyoxyméthylène ou en polyacétal POM, accouplés à des engrenages en acier. Ils ont examiné l'effet de la température sur le comportement en fatigue sur un banc d'essai qui permet d'étudier le rendement, l'usure, la température et le nombre de cycles en cas de défaillance des engrenages en temps réel.

Ces essais ont été effectués sans lubrification à une vitesse de rotation fixe de 1500 tr/min, et trois couples différents, soit à 1 Nm, 1.2 Nm et 1.4 Nm. Ces essais ont été déroulés à la température ambiante non contrôlée de 24 ± 2 °C et d'autres essais à des températures contrôlées dans une chambre atmosphérique où la température était réglée à 30 °C, 50 °C et 70 °C. Les engrenages ont tourné jusqu'à 2×10^6 cycles ou jusqu'à la défaillance, selon que certains essais arrivaient plus tôt ou non à la rupture.

Les chercheurs, M. Kalin et Kupec, ont calculé le rendement sur la base des couples d'entrés et de sortis. La température des surfaces des racines de la dent d'engrenage entraîné a été mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge (IR).

Cette étude montre que le contrôle de la température des engrenages ne peut être négligé dans les essais d'usure et de fatigue des engrenages en polymère.

Ces auteurs ont conclu que la charge et la température contrôlée affectent les propriétés de déformation (inclinaison de la dent), l'usure et la géométrie (forme des dents, tolérances), et donc le coefficient de frottement. Ce dernier à son tour influe sur la température et modifie les conditions d'engrènement. Cela réduit de façon significative la durée de vie en fatigue des engrenages en polymère. Par exemple, le nombre de cycles à la défaillance est de quatre fois moins à 70 °C et deux fois moins à 50 °C par rapport au nombre de cycles à 30 °C. En outre ils ont constaté que l'augmentation de la température diminue le rendement (9 % de réduction lorsque la température est 70 °C avec un couple de 1.4 Nm).

D'autre part, dans des conditions de température non contrôlées, la température des engrenages en polymère a continué d'augmenter et ne s'est jamais stabilisée pendant 2 millions de cycles. Cette augmentation qui dépend du couple a été expliquée par l'accumulation de chaleur qui ne peut être éliminée par un refroidissement.

2.7 – Synthèse des différentes variables importantes la revue de littérature

Aux termes de notre revue de littérature, les différents articles et revues consultés nous ont permis d'avoir une première approche sur les principaux travaux existants et surtout nous avons pu constater qu'aucun ouvrage ne prenait en compte l'usage de thermoplastique recyclé, et aucun test n'a été fait en ce qui concerne les engrenages en composite recyclés. Cela étant nous avons pu établir un tableau des variables indépendantes récurrentes qui ont été retenues dans la plupart des travaux.

Tableau 2.4 : synthèses des principales variables liées aux études et analyse sur les composites

Variable	Réurrences/nombre d'articles consultés	Pourcentages
Types de thermoplastiques	15/15	100 %
Type de fibres	8/15	53.33 %
Pourcentage de mélange	15/15	100 %
Procédé de fabrication	12/15	80 %
Essais mécaniques	15/15	100 %
Essais thermiques	7/15	46.67 %
Essais tribologique	4/15	26.67 %

Cette illustration nous permet de cimenter les bases et approches dont on tiendra compte pour la méthodologie à appliquer lors de nos travaux. En effet, le type de thermoplastiques (polyéthylène, polypropylène, etc....), le type de fibres (longues ou courtes), le pourcentage de mélange, la procédure de fabrication, et les essais mécaniques, thermiques, et tribologique, sont les critères ou paramètres majeurs qui influent directement sur les résultats de l'analyse et donc sur les objectifs fixés par le présent travail de recherche.

Ceci permet d'établir un diagramme d'Ishikawa mettant en rapport les différentes variables et les différentes actions à mener au cours de nos travaux

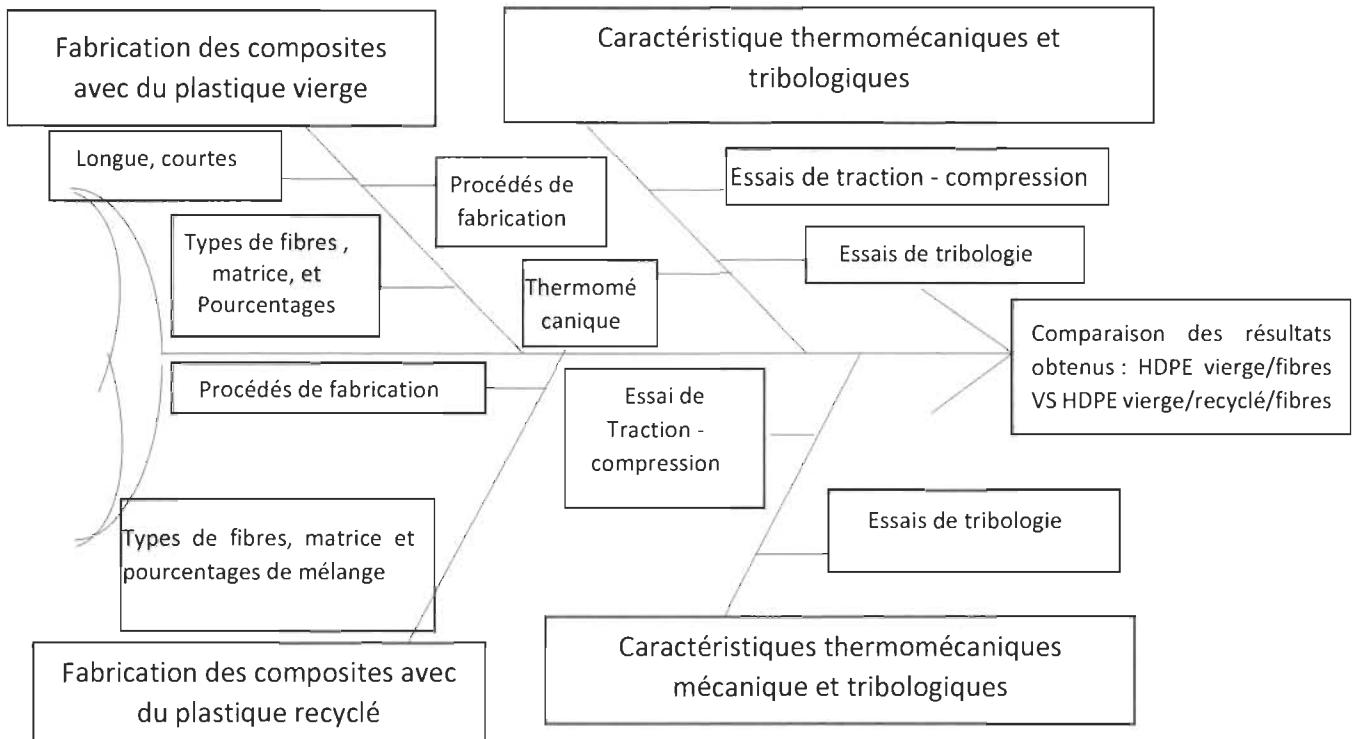


Figure 2.7 : Diagramme d'Ishikawa représentatif de la méthodologie du travail de recherche

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE

3.1 – Méthodologie

Comme décrit plus haut dans les objectifs et illustré dans le diagramme d’Ishikawa ; la méthodologie de notre étude consiste à réaliser des tests mécaniques et tribologiques sur des matériaux composites de différentes compositions. Ces résultats permettront par la suite d’établir une matrice comparative des propriétés mécaniques de composites obtenues avec le plastique vierge versus le plastique recyclé pour les pourcentages de mélange quasi comparables.

Cela étant pour la fabrication et les analyses concernant les composites avec du plastique vierge, plusieurs études antérieures ont été réalisées au sein de l’UQTR. Les procédés de fabrication et résultats obtenus par ces travaux ont été approuvés et acceptés, et ont fait l’objet d’une approbation par un jury. C’est le cas de l’étudiant Abdelhadi Mahrouk qui a travaillé sur la caractérisation tribologique des engrenages en composites et nanocomposites à base de polyéthylène vierge.

Alors, concernant nos travaux, nous allons dans un premier temps présenter la méthodologie utilisée pour la fabrication de ces éprouvettes de composite avec du plastique vierge et nous allons par la suite considérer ses résultats comme valeurs obtenues pour les différents tests à effectuer.

En outre la deuxième partie concernera donc la fabrication des composites avec du plastique vierge et du plastique recyclé, ce qui constitue une base fondamentale et novatrice de notre travail. Nous y présenterons les différentes procédures et modes opératoires effectués lors de la fabrication et des essais mécaniques et tribologiques.

3.2 - Plan d’expérience des mélanges : Répartition des pourcentages par mélanges

Dans cette section nous présenterons la répartition retenue pour la composition de chaque type de mélange destiné essais.

3.2.1 – Cas des mélanges à base de polyéthylène HDPE vierge

Pour le HDPE vierge la répartition est simple et repose uniquement sur le pourcentage de fibres par mélange vu qu'il y a qu'un type de polymère utilisé. De la littérature, il ressort le tableau 3.1 ci-dessous qui présente les pourcentages de mélanges pour le cas des composites à base de polyéthylène vierge.

Par ailleurs il faut bien comprendre que pour chaque mélange on a 3% de MAPPE qui assure une liaison entre les différents éléments du composite

Tableau 3.1 : Tableau des pourcentages de mélange de composites HDPE vierge

Pourcentage de fibres	10%	20%	30%	40%
Pourcentages de HDPE vierges	87%	77%	67%	57%

3.2.2 – Cas des mélanges à base de polyéthylènes HDPE vierges et recyclés

Il nous a été plus complexe d'ériger un tableau pour les composites HDPE vierges et recyclés. Premièrement aucun article, aucune revue ne faisait état d'étude ou de caractérisation de composites HDPE vierges et recyclés, cet aspect novateur de notre étude la rend non seulement particulière et difficile à réaliser, mais aussi pionnière dans son genre. Deuxièmement, du point de vue des objectifs de l'étude, une comparaison pertinente, implique de comparer les deux types de composites dans des pourcentages égaux et analogues.

Pour ce faire, étant donné que la variable qui demeure constante dans les deux cas de figure est le pourcentage de fibre ; nous avons choisi d'ériger un ensemble de variétés de composition de pourcentage de mélange de HDPE vierge et recyclé pour chacun des quatre pourcentages de fibres connus

Le résultat obtenu est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.2 : tableau récapitulatif des différentes compositions de mélanges retenues

Mélanges	% fibres	%MAPE	% PE vierge	% PE recyclé
1	30	3	13	54
2	30	3	13	54
3	30	3	13	54
4	30	3	13	54
5	30	3	13	54
6	40	3	51	6
7	40	3	51	6
8	40	3	51	6
9	40	3	51	6
10	40	3	51	6
11	35	3	50	12
12	35	3	50	12
13	35	3	50	12
14	35	3	50	12
15	35	3	50	12
16	35	3	14	48
17	35	3	14	48
18	35	3	14	48
19	35	3	14	48
20	35	3	14	48
21	20	3	7	70
22	35	3	50	12
23	30	3	40	27

Nous avons donc en réalité plusieurs échantillons pour un même type de mélange à réaliser. Cette stratégie est utile pour avoir un réel aperçu du comportement de chaque pourcentage de mélange.

En compilant le tableau en regroupant le type de mélange identique on obtient le tableau 3.3 rassemblant les différents tests par groupe de mélange identique

Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif des types d'éprouvettes classés par pourcentage de fibres

Mélanges	% fibres	%MAPE	% PE vierge	% PE recyclé
1 (mélange 24)	0	3	0	97
6 (mélange 21)	20	3	7	70
7 (mélange 23)	30	3	40	27
2 (mélange de 1 à 5)	30	3	13	54
5 (mélange de 16 à 20)	35	3	14	48
3 (mélange de 6 à 10)	40	3	51	6
4 (de 11 à 15 et le 22)	35	3	50	12

3.3 – Fabrication de la pâte composite contenant du HDPE vierge

3.3.1 – Choix de la matrice polymère

Le choix de la matrice pour le composite a été dicté d'une part par la nature de la recherche, et d'autre part par la disponibilité de la ressource au niveau de CRMS (Centre de Recherche sur les Matériaux Lignocellulosique) devenu I²E³ de l'UQTR.

La matrice polymère retenue est une matrice thermoplastique ; il s'agit du HDPE (High Density Polyethylene) encore appelé PEHD (Polyéthylène à Haute Densité). Il est fourni par Nova Chemicals, avec une température de fusion comprise entre 128 °C et 135 °C et une masse volumique de 0.995 g/cm³. Il se présente sous forme de granulés sphériques avec un diamètre de 2 à 3 mm.

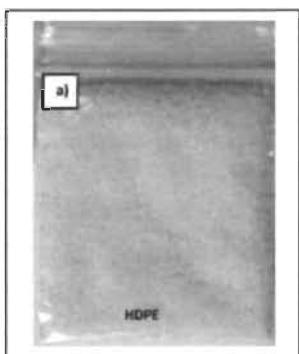


Figure 3.1 : matrice polymère utilisée pour les composites avec du plastique vierge (HDPE)

3.3.2 – Les fibres de bois pour le renfort du composite

Tout comme la matrice, les fibres retenues ont été les fibres de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), fournies par le CRML. Elles se présentent sous forme de fibres courtes industrielles (TMP 20 – 60 mesh). Ces fibres doivent être séchées dans un four à 70 °C pendant au moins 24h avant son utilisation. Ce processus permet d'éradiquer l'humidité accumulée par la fibre.

Les tableaux 3.4 et 3.5 présentent respectivement les caractéristiques mécaniques des fibres de bouleau jaune et les dimensions des fibres

Tableau 3.4 : caractéristiques mécaniques et physiques des fibres de bouleau jaune

Densité (g/m ³)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur spécifique massique à 17 °C (J.kg.K ⁻¹)	Module élastique E ₁ (GPa)	Module de cisaillement G	Coefficient de poisson v
0.62	0.15	1300	13.9	0.9452	0.451

Tableau 3.5 : Dimensions moyennes des fibres de bouleau Jane

Dimensions	Fibres courtes	Fibres longues
Longueur moyenne L (mm)	0.49	1.42
Diamètre moyen D (μm)	4.7	4.6

Les figures 3.2, et 3.3 illustrent respectivement les fibres de bouleau jaune et la mise au four pour le séchage.

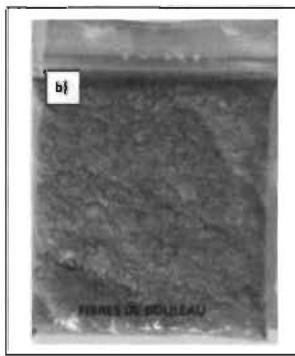


Figure 3.2 : Texture et morphologie des fibres de bouleau jaune



Figure 3.3 : Séchage des fibres de bouleau Jaune au four

3.3.3 – L’agent de couplage

Pour le choix de l’agent de couplage, une attention particulière a été portée sur le Polyéthylène greffé Anhydride Maléique (MAPE). Il est l’agent de couplage le plus utilisé pour la fabrication des matériaux composites. Il contient 1.5 % d’anhydride maléique et se présente sur la forme de granulés sphérique de 1.5 à 3 mm de diamètre, avec une température de fusion qui atteint 124 °C.

Toutefois il est recommandé d’utiliser l’agent de couplage (MAPE) à une valeur proportionnelle de 3% du poids total. Car pour une valeur excédant les 3%, on risquerait d’assister à l’auto-enchevêtrement des chaînes du MAPE.

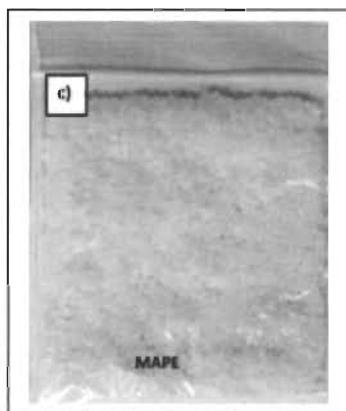


Figure 3.4 : MAPE sous forme de granule sphérique

3.3.4 – La préparation des mélanges

Tout d’abord il y a lieu de bien comprendre qu’au cours de ce projet, toutes les étapes de préparation de la pâte composite (fabrication de matériaux) ont été faites dans l’enceinte des laboratoires du Centre de Recherche sur les Matériaux Lignocellulosiques de L’UQTR.

Pour ce projet, les matériaux composites ont été préparés à partir de polyéthylène à haute densité PEHD renforcés par des fibres naturelles de bois de bouleau jaune. Cependant quatre taux de fibres ont été sélectionnés et mélangés soigneusement avec la matrice du HDPE.

Le mélange polyéthylène PEHD / Fibres naturelles de bois de bouleau a été effectué dans un mélangeur discontinu interne à rouleaux (Thermon, CW, Brabender, Modèle T-303) a une température de 175 °C. Pour chacun des quatre cas de figure, on introduit 3% en poids du

MAPE (agent de couplage) le mélange a été refroidi par la suite pour obtenir 100%. Une fois que la pâte au niveau du mélangeur présente une texture dorée, celle-ci est tout de suite retirée, puis découpée et laissée au repos pour refroidir. À la suite la pâte refroidie sera granulée.

On a ainsi fabriqué quatre pâtes de matériaux composites différents ayant respectivement les pourcentages de fibres de bouleau de 10%, 20%, 30%, et 40%. Les composites ainsi constitués serviront à fabriquer des échantillons sur lesquels seront effectués les différents tests à faire.

Les figures 3.5 et 3.6 présentent respectivement un aperçu des différents pourcentages de fibres énumérés et la matrice HDPE vierge.

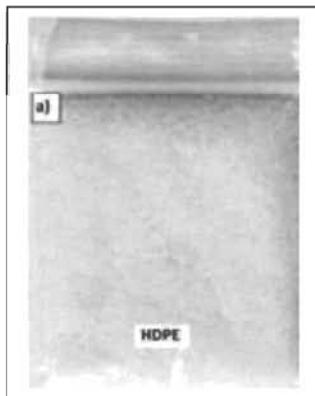


Figure 3.6 : Polyéthylène à haute densité

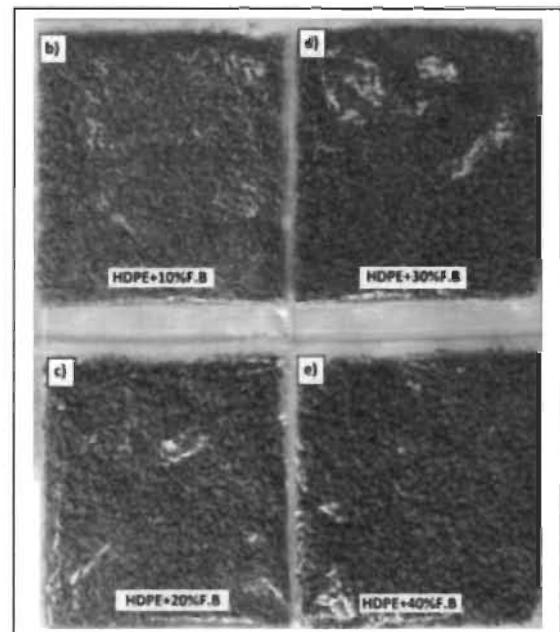


Figure 3.5 : Aperçu des différents pourcentages de fibre de bouleau jaune dans le mélange

Les quatre mélanges préparés et le PEHD vierge ont été utilisés ensuite pour fabriquer des éprouvettes.

3.3.5 – Procédure pour la fabrication de la pâte composite contenant du HDPE vierge

L'obtention ou plus précisément la fabrication de la pâte fait intervenir plusieurs étapes qui diffèrent selon qu'on utilise le plastique vierge ou le plastique vierge + recyclé.

Pour la fabrication de la pâte avec du plastique vierge, les étapes sont les suivantes :

1- Granuler le plastique vierge avec une machine à granuler

Dans la plupart des cas, les dimensions du plastique fournies sont inadéquates, il faut donc le granuler pour obtenir des dimensions fines pour le mélangeur Brabender (figure 3.9)



Figure 3.7 : Machine à granuler H. Dreher Maschinenbau

2- Peser les différents composants séparément pour avoir 150 g au total selon le tableau des proportions

À l'aide d'une balance de haute sensibilité, on mesure les différentes proportions pour chacun des quatre mélanges. Le malaxeur (Brabender), étant limité à 150 g/malaxage, on se verra obliger respecter les différents pourcentages pour un total de 150g. C'est-à-dire que pour la fabrication des éprouvettes de 40% de fibres de bouleau par exemple on utilisera 40% de 150g comme proportion massique de fibres de bouleau dans le mélange total, soit 60g de fibres de bouleau, 4.5g de MAPE et 85.5g de HDPE.

La limite de capacité du mélangeur nous impose de répéter à plusieurs reprises, le malaxage d'un même pourcentage jusqu'à l'obtention d'une masse de pâte composite suffisante pour la fabrication des éprouvettes.

La figure 3.8 ci-dessous présente la balance utilisée dans les laboratoires du CIPP



Figure 3.8 : Balance hautement sensible (UQTR)

3- Mettre en marche la machine à mélanger et attendre que les rouleaux atteignent 200 degrés Celsius (environ 7 min)

Le mélangeur, ou encore Brabender est une machine munie d'un système de résistance chauffante réglable et de deux tambours qui tournent en sens inverse l'un par rapport à l'autre. Son fonctionnement permet ainsi avec la bonne température de réaliser un mélange homogène des différents éléments constitutifs du composite.

4- Ajouter progressivement les différents éléments de la pâte composite en s'assurant que le mélange soit homogène

Une fois le Thermotron allumé et les différentes proportions préalablement mesurées par la balance, nous commençons dans un premier temps par verser minutieusement le polyéthylène vierge HDPE le long du tambour avant en faisant attention de bien l'étendre sur toute sa surface pour avoir une répartition et une meilleure efficacité. En général la chaleur du tambour retient les granules lorsqu'elles se déversent. Une fois le polyéthylène vierge étendu, nous effectuons la même opération avec l'agent de liaison MAPE. Celui-ci permet une meilleure cohésion entre les fibres de bois et le HDPE préalablement étalés sur le tambour. Une fois l'agent de liaison et le HDPE parfaitement mélangés, c'est au tour du bouleau jaune préalablement séché pendant 24h d'être mélangé avec les autres composés. Après quelques minutes, on obtient comme résultat une pâte composite qui servira à la fabrication des échantillons.

Toutefois au cours du processus on doit de temps à autre retirer puis remettre la pâte à l'aide d'un outil très pratique sur les rouleaux du Thermotron dans le but d'assurer un mélange homogène de la pâte. Cette manœuvre dans son ensemble doit être faite avec rapidité et délicatesse pour éviter un durcissement précoce de la patte au moment de la manœuvre. Ce qui entraînerait aussi tôt l'arrêt de toutes les opérations pour une maintenance.

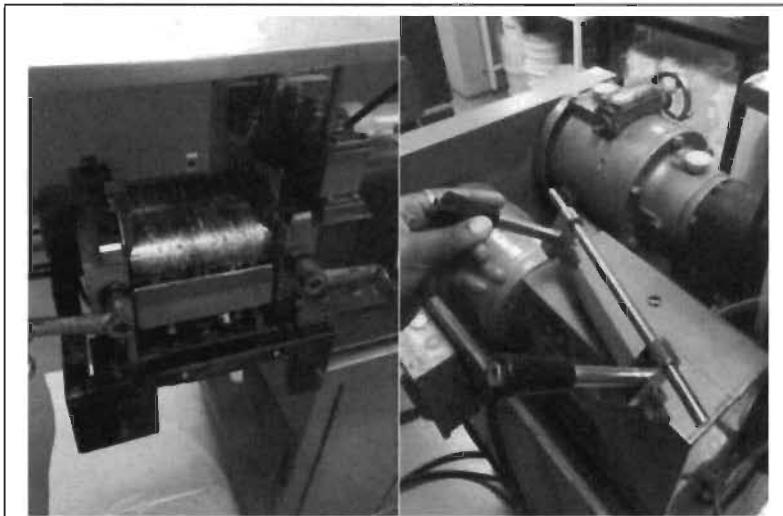


Figure 3.9 : le Brabender Thermotron muni de deux tambours munis de résistances chauffantes incorporées

Les étapes 1 à 5 seront répétées jusqu'à l'obtention d'une masse de composite considérée comme suffisante, et ceci pour chacun des quatre mélanges du composite HDPE vierge à faire.

5- Passer le mélange obtenu à la granuleuse

Le but de cette étape consiste à rendre la pâte en petits morceaux fins et parfois poussiéreux afin de les amener pour la transformation en éprouvettes de test. Donc une fois la pâte composite enlevée du Brabender, elle doit être découpée en lamelle de petite superficie pour la granuleuse (figure 3.7 présentée plus haut) car elle est munie d'un orifice ne pouvant recevoir que des éléments d'une certaine grandeur. Une fois granulée, la patte composite se présente sous forme de petits copeaux fins prêts pour l'injection.

3.4 – Fabrication de la pâte composite contenant du HDPE vierge et du HDPE recyclé

3.4.1 – Choix des différents éléments constitutifs du mélange

En ce qui concerne les différents éléments concernant la composition du mélange pour le cas du composite HDPE vierge et recyclé, ils sont identiques à ceux cités plus haut dans la section 3.2 pour le composite composé de HDPE vierge uniquement avec une différence au niveau de la matrice.

3.4.2 – Choix de la matrice ou du polymère

La matrice de ce deuxième composite est en effet composée de polyéthylène HDPE vierge et de Polyéthylène HDPE recyclé.

Concernant le polyéthylène vierge, il est identique à celui du composite contenant du polyéthylène vierge uniquement, et sa présentation a été faite dans la sous-section 3.2.1

Pour le polyéthylène recyclé, à la différence du polyéthylène vierge reçu de l'Université par l'entremise du CIPP, nous l'avons acheté auprès d'un fournisseur. Le plastique recyclé est reçu sous forme de feuille d'une épaisseur de 10 mm, il présente une texture extérieure sombre. Les feuilles de polyéthylène recyclé sont découpées en petits morceaux, assez pour qu'il puisse passer à travers l'orifice de la granuleuse. Une fois dans la granuleuse, le polyéthylène recyclé subit une modification de forme et de dimension. On obtient des granules de PE recyclé.

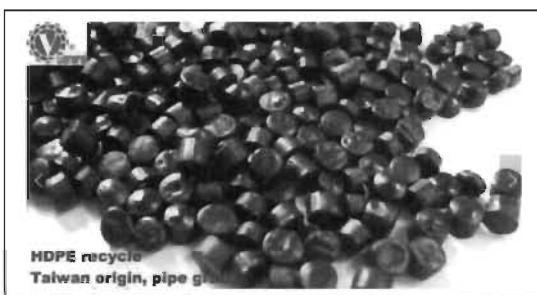


Figure 3.10 : texture générale du polyéthylène HDPE recyclé et granulé (tiré de https://www.alibaba.com/product-detail/HDPE-High-Density-Polyethylene-Recycle-from_128458486.html)

3.4.3 – Procédure pour la fabrication de la pâte composite HDPE vierge/HDPE recyclé/fibre de Bouleau jaune

En ce qui concerne la fabrication de la pâte composite qui contient du polyéthylène recyclé, la procédure de fabrication est quasi identique à celle de la pâte contenant du polyéthylène vierge décrite plus haut dans la sous-section 3.2.4. Tout de même on note quelques différences au niveau des étapes 2 et 4 que l'on va présenter ci-dessous.

2- Peser les différents composants séparément pour avoir 150 g au total selon le tableau des proportions

La différence fondamentale est qu'ici, vue que l'on introduit en plus du plastique vierge, le plastique recyclé, alors les quantités seront toujours pesées pour une masse totale de 150g (qui est la capacité maximale du mélangeur), mais à des proportions différentes de HDPE vierge et recyclé. C'est-à-dire que pour la fabrication des éprouvettes (contenant du HDPE vierge et recyclé) de 40% de fibres de bouleau par exemple on utilisera 40% de 150g comme proportion massique de fibres de bouleau dans le mélange total. 3% de MAPE, 57% de HDPE vierge et recyclé.

Dans les 57%, on fera varier chacun des composants HDPE vierges et HDPE recyclés entre 20% 30%, et 40%) et pour chaque variation on produira plusieurs échantillons identiques qui feront l'objet de test afin d'obtenir des résultats fiables.

4- Ajouter progressivement les différents éléments de la patte composite en s'assurant que le mélange soit homogène

La différence fondamentale de l'étape quatre se situe au niveau du début de la procédure. C'est-à-dire qu'après avoir mis le Brabender en marche et les tambours à la température 200 °C adéquats pour le mélange, on verse minutieusement le polyéthylène vierge sur le tambour avant chauffé. Puis une qu'il a fondu sous l'effet de la haute température des tambours, on verse par la suite le polyéthylène recyclé, et on patiente jusqu'à ce qu'il fonde aussi. Ensuite on verse le MAPE et le bouleau en suivant scrupuleusement la description faite plus haut, jusqu'à l'obtention de la pâte composite.

3.5 – Fabrication des éprouvettes composites pour les tests

Tout d'abord il est à noter que, quel que soit le type de pâte composite (avec du HDPE vierge ou avec du HDPE vierge et recyclé), le mode opératoire et les appareils utilisés pour la fabrication des éprouvettes seront identiques.

Pour la fabrication d'éprouvettes, ces appareils et modes opératoires sont déterminés par la nature et les objectifs de notre étude, à savoir la comparaison du comportement thermomécanique et tribologique des deux types de pâtes composites.

Pour ce faire nous allons effectuer trois types de tests spécifiques, qui sont :

- Les essais ou tests de traction sur des éprouvettes de traction normalisées
- Les essais ou tests thermomécaniques sur des engrenages
- Les essais ou tests tribologiques sur rondelles circulaires

Chaque type de test nécessite des échantillons de test ou éprouvettes avec des formes bien spécifiques définies par les appareils de test. Ainsi, nous devons fabriquer quatre formes d'éprouvettes par types de pâtes composites.

3.5.1 – Fabrication d'éprouvettes de traction.

Pour notre étude nous avons choisi de fabriquer les échantillons à l'aide de presse à injection (ZERES ZE900). Ce choix se justifie tant par l'efficacité à produire rapidement des pièces, que par son taux de fiabilité et de réussite des pièces produites.

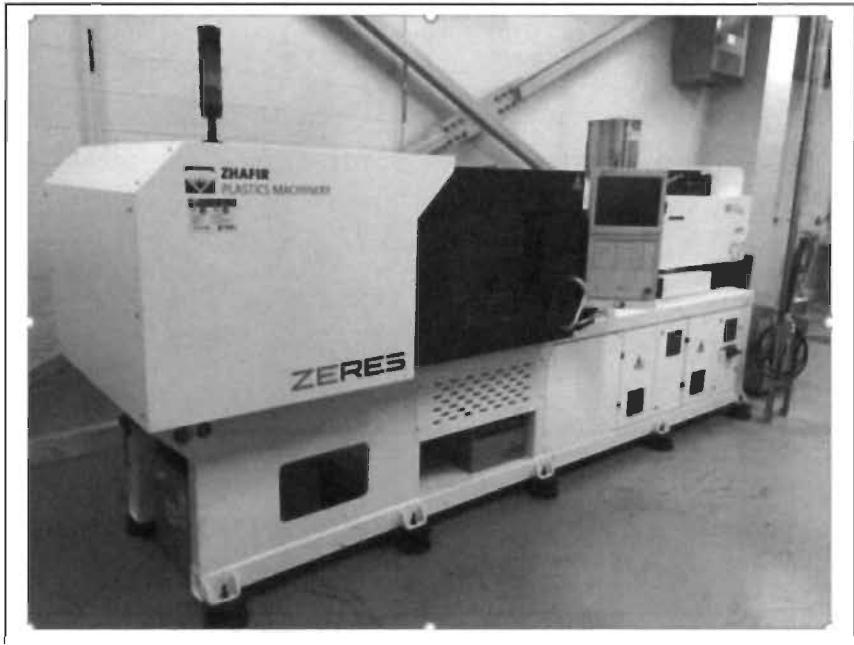


Figure 3.11 : Presse à injection ZERES ZE900

3.5.1.1 – Schéma de Principe et principe de fonctionnement d'une presse pressent à injection

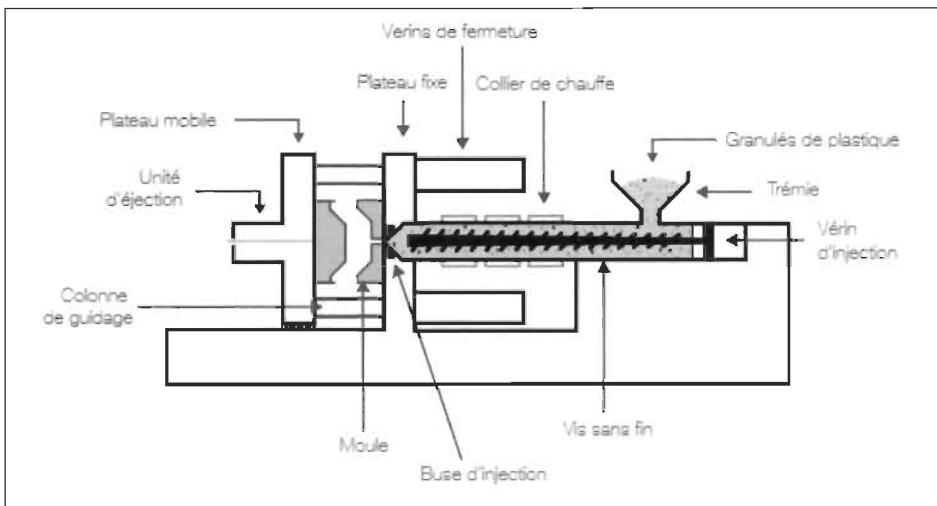


Figure 3.12 : Schéma de principe d'une presse à injection

Tel qu'illustré sur le schéma de principe (Fig. 3.12), le principe de fonctionnement d'une presse à injection est assez simple. Des granulés de 2 à 3 mm de pâte composite sont versés dans la trémie. Ensuite, cette matière est ramollie en étant portée à la température réglée grâce à l'action combinée de la friction de la vis sans fin et des colliers de chauffe. La matière ainsi malléable est poussée vers la buse puis injectée dans le moule grâce au vérin d'injection.

La pression d'injection peut atteindre 2500 bars. La matière se répartit de façon homogène dans la cavité de l'outillage pour prendre sa forme définitive. La pièce est ensuite refroidie en quelques secondes entre 50°C et 80°C afin de la solidifier. Ensuite la presse ouvre le moule, et la pièce est éjectée. La presse se referme et un nouveau cycle recommence.

Pour ce qui est de la presse à injection ZERES ZE900, le principe est le même et toutes les différentes températures et pressions et vitesses d'injection sont programmées à l'aide d'un logiciel de contrôle installer sur l'ordinateur de commande relier à la presse à injection ZERES ZE900.

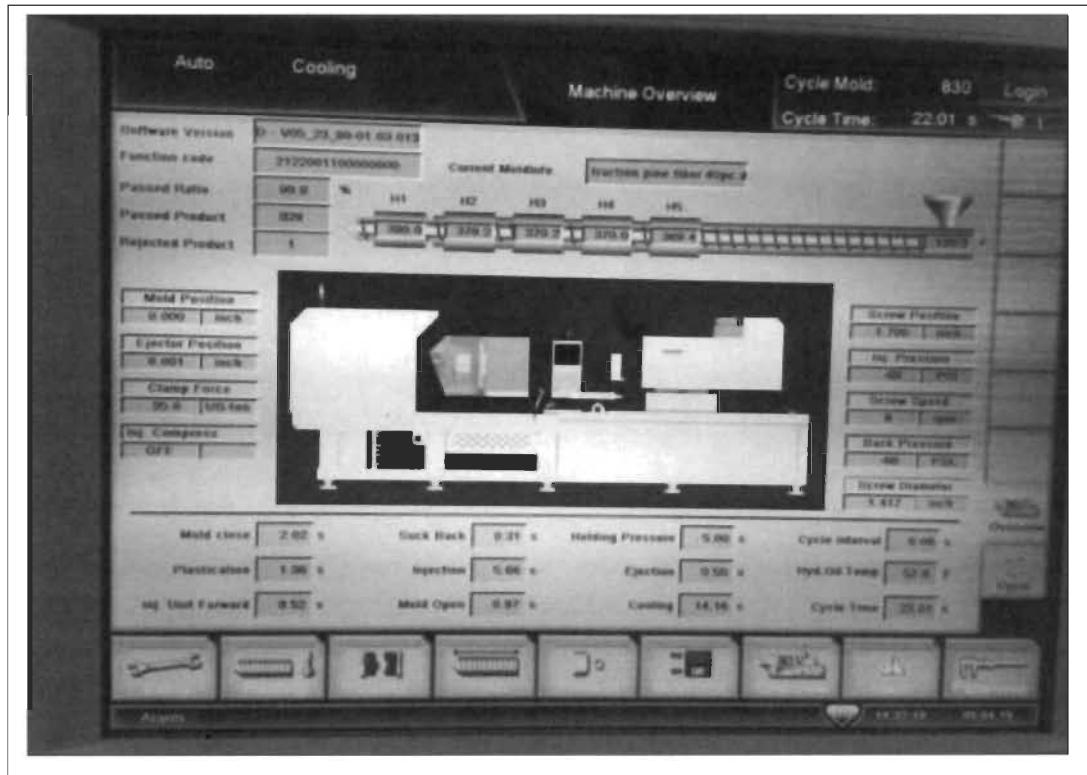


Figure 3.13 : Interface de commande de la presse à injection ZERES

3.5.1.2 – Caractéristiques du modèle et les éprouvettes obtenues par injection

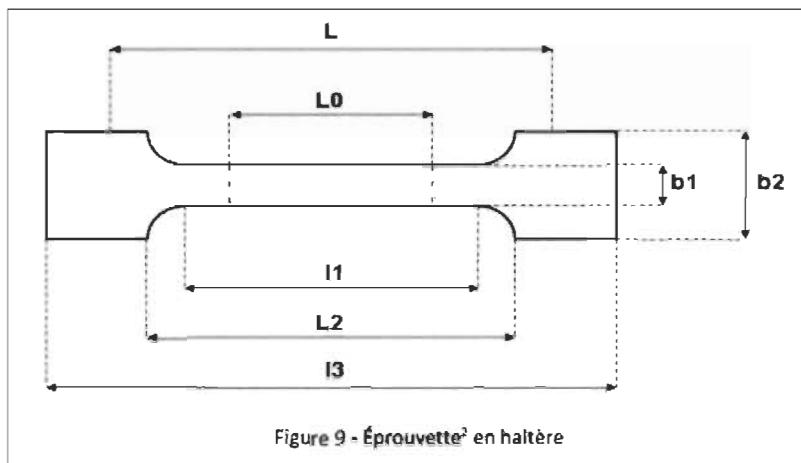


Figure 3.14 : Dimensions normalisées standard des éprouvettes de traction

Avec :

$$i_3 = 150 \text{ mm},$$

$$b_1 = 10 \text{ mm},$$

$$\text{épaisseur} = 6 \text{ mm}.$$

$$l_1 = 80$$

$$b_2 = 20$$

les figure 3.15-a et 3.15-b ci-dessous illustre un exemple d'éprouvette de traction obtenue par injection respective des pâtes composites HDPE vierges, et HDPE vierges et recyclés.

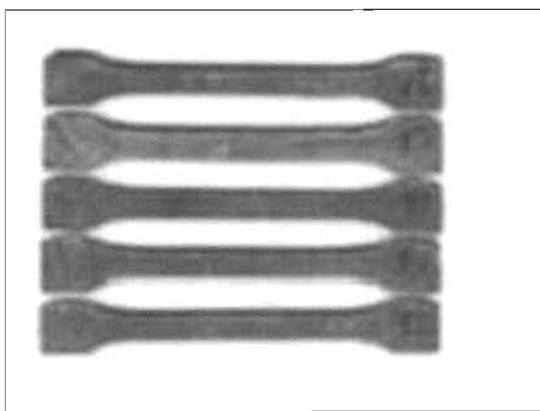


Figure 3.16 : Eprouvettes composite contenant juste du HDPE vierge

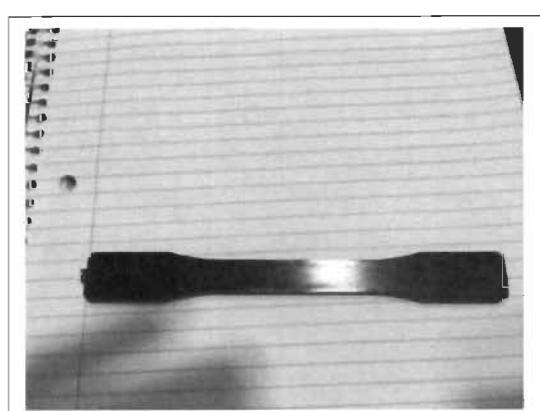


Figure 3.15 : Eprouvettes composite contenant juste le HDPE vierge et du HDPE recyclé

La différence fondamentale réside dans la texture externe. En effet l'éprouvette ne contenant que du HDPE vierge a une texture brun clair, alors que l'éprouvette contenant du HDPE vierge et du HDPE recyclé présente une texture extérieure sombre.

3.5.2 – Fabrication d'éprouvettes d'engrenages pour les tests thermomécaniques

La fabrication des roues dentées ou éprouvettes d'engrenages se fera par thermocompression. Car étant donné que les moules pour leur fabrication n'étaient disponibles que sur la presse hydraulique Dake (ou thermopresse) de l'UQTR.



Figure 3.18 : Thermopresse DAKE

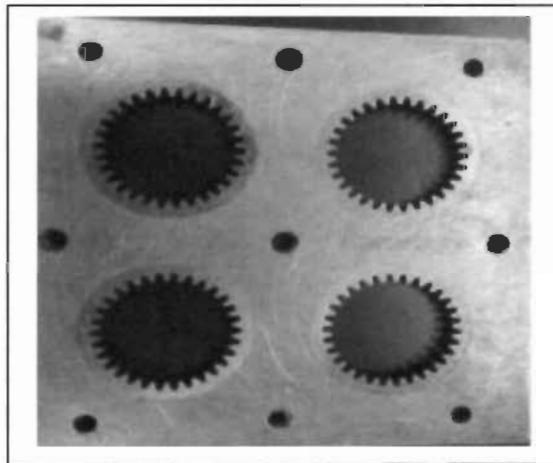


Figure 3.17 : Moule A283

La fabrication des engrenages sera effectuée par moulage, plus précisément le moulage par thermocompression. La presse est constituée de deux plaques dont les températures sont asservies par un régulateur et ajustées à 200°C sur la plaque inférieure et supérieure.

Les empreintes de moule sont remplies par des quantités soigneusement pesées des granulés des composites précédemment fabriqués et le moule placé sur la plaque inférieure de la presse reçoit son couvercle. La plaque inférieure est ensuite montée lentement jusqu'à fermeture ; la pression commence à s'appliquer progressivement sur le moule en trois étapes séparées jusqu'à 10 MPa. Une fois la température et la pression stabilisées, le moule est maintenu dans ces conditions (10MPa, 200°C) pendant environ 20 minutes pour assurer le plus

possible la qualité des roues dentées et minimiser les défauts. Ensuite, le moule refroidi jusqu'à 60 °C est retiré de la presse puis on procède aux démontage et extraction d'engrenages.

Ce processus utilise les effets combinés de la température et de la pression appliquée par la machine afin de créer des pièces selon une forme normalisée. Pour que les pièces finales présentent les caractéristiques voulues, les paramètres qu'il faudrait certains critères :

- La quantité de matière.
- La pression appliquée.
- La température du moulage.
- La durée du processus.
- La vitesse de fermeture de la presse.
- La durée et la technique de refroidissement.

La presse de thermocompression utilise un moule en acier A283 plaqué en cuivre pour éviter les corrosions galvaniques. Ce moule est destiné exclusivement aux engrenages cylindriques droits. Le choix de cette géométrie de denture est basé principalement sur le fait qu'elles sont les modèles géométriques les plus simples à fabriquer par thermocompression. Les autres géométries telles que les dentures hélicoïdales ont besoin des finitions par usinage ce qui augmente d'autres procédures et donc ajoute du temps supplémentaire pour la fabrication des éprouvettes.

3.5.2.1 – Vérification de conformité des éprouvettes obtenues

Malgré l'optimisation de la méthode de fabrication des roues dentées par compression, des défauts peuvent être constatés visuellement, comme le manque de matière sur l'une des deux surfaces de la roue et/ou sur une ou plusieurs dents.

Après la fabrication, les engrenages obtenus traversent une série de tris. Le premier est un tri visuel pour exclure les engrenages qui présentent des difformités majeures telles que :

- Malformation au niveau des dents.
- Concavité centrale causée par un manque de matière durant la thermocompression.
- Porosité dominante au niveau surfacique... etc.



Figure 3.19 : Exemple d'éprouvette présentant des défauts de disformités majeurs sur le flanc de la denture

Ensuite le tri concernant les dimensions et marges de tolérance acceptables. On effectue une série de mesures dimensionnelles sur les engrenages afin de vérifier leurs conformités, tout en respectant la tolérance d'entraxe décrite.

Les figures 3.21 et 3.20 montrent les procédures de mesure de diamètre et d'épaisseur

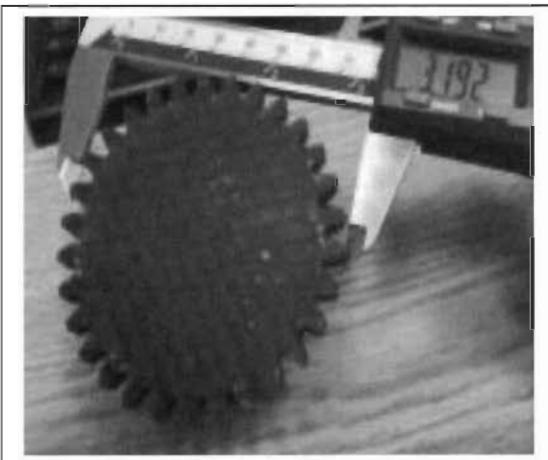


Figure 3.21 : Vérification du diamètre



Figure 3.20 : Vérification de l'épaisseur

Le tableau 3.6 ci-dessous présente les spécifications normalisées des éprouvettes des roues à dentures droites

Tableau 3.6 : caractéristiques des éprouvettes d'engrenages

Module m [mm]	2.54
Nombre de dents	30
Angle de pression α [$^{\circ}$]	20 $^{\circ}$
Largeur de l'engrenage b [mm]	6.5
Pas diamétral P [po-1]	10
Rapport de transmission	1
Diamètre de tête d_e [mm]	81.28
Diamètre primitif D_p [mm]	76.2
Diamètre de pied D₂ [mm]	69.85
Épaisseur de la dent au cercle primitif t_p [mm]	4
Creux hf [mm]	3.175

3.5.2.2 – Validation et sélection des éprouvettes d'engrenages

Une fois la fabrication réalisée et les différents tris effectués, les éprouvettes obtenues se présentent tels qu'illustrés par les figures ci-dessous. Ces deux images représentent respectivement les éprouvettes à base de polyéthylène vierge, et de polyéthylène vierge et recyclé qui sont acceptées.

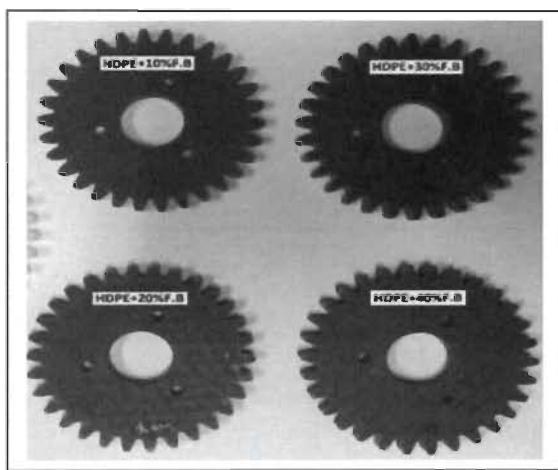


Figure 3.22 : Eprouvettes d'engrenage HDPE vierge

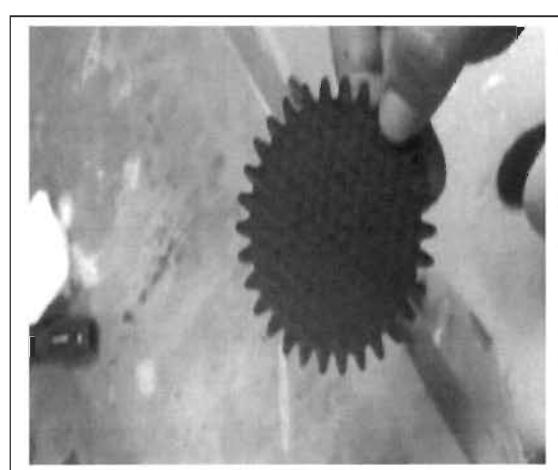


Figure 3.23 : Eprouvettes d'engrenages HDPE vierge et recyclé

3.5.3 – Fabrication d'éprouvettes rondelles ou disques pour les tests de tribologie.

La fabrication de rondelles pour les essais de tribologie s'est faite par thermocompression. Car étant donné que les moules pour leur fabrication n'étaient disponibles que sur la presse hydraulique Dake (ou thermopresse) de l'UQTR.

Cela étant, les procédures de fabrication, de vérification et de sélection étant les mêmes que celles exposées à la sous-section 3.4.2, nous présenterons simplement les éprouvettes obtenues

3.5.3.1 – Les éprouvettes obtenues

Les figures suivantes présentent respectivement les rondelles HDPE vierges et les rondelles HDPE vierges et recyclées obtenues.

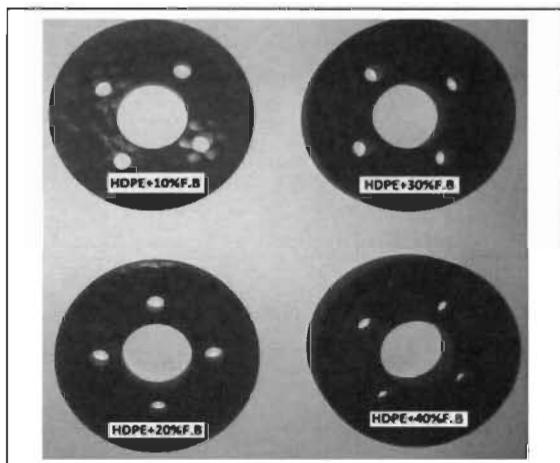


Figure 3.25 : Rondelles en HDPE vierge

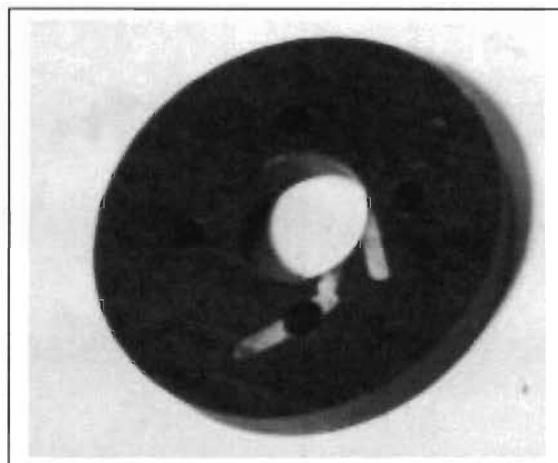


Figure 3.24 : Rondelle à base de HDPE vierge et recyclé

Les spécifications des disques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.7 : Caractéristiques dimensionnelles des disques normalisés pour les tests de tribologie

Épaisseur	8 mm
Diamètre	60 mm

3.6 – Tests et essais mécanique, thermomécanique et tribologique

Étant donné la nature et les objectifs fixés de notre étude, nous effectuerons deux séries de tests pour chacun des essais à faire. La première série de tests se fera sur les composites à base de polyéthylènes vierges, tandis que la deuxième série concernera les composites à base de polyéthylènes vierges et recyclés.

Les différents essais mécanique, thermomécanique et de tribologie seront identiquement effectués pour chaque type ce composite afin d'obtenir des valeurs justes et fiables.

3.6.1 – Essais mécaniques sur les éprouvettes de traction

Pour la réalisation des essais de traction, nous utiliserons une machine de traction appelée INSTRON présenté à la figure 2.28



Figure 3.26 : Appareil pour les tests de traction

3.6.1.1 – Plan d’expérience : essais de traction

Pour les tests de traction ; des échantillons ont été effectués sur un testeur Instron (modèle LM-U150) à température ambiante. Pour se faire, on installe sur l’Instron, une cellule de charge

de 50 kN. À l'aide d'un extensomètre de 25 mm relié au système d'acquisition de données de la machine Instron et fixé à l'éprouvette, on enregistre l'évolution de la déformation.

La vitesse des essais était de 2 mm/min. Les propriétés de traction, y compris la charge maximale (MOR), le module d'élasticité (MOE) et la déformation à la rupture, ont été déterminées selon la norme ISO 527-1:20 [35].

3.6.2 – Essais thermomécaniques sur les éprouvettes d'engrenages

Les études expérimentales dans ce projet consistent d'une part à réaliser des tests sur banc d'essai à engrenages en fonctionnement réel simulé pour l'évaluation de l'échauffement, la perte de masse et la perte de couple.

Les essais de caractérisation d'usure par la perte de masse et de couple des engrenages ont été réalisés sur le banc d'essai à engrenages du laboratoire de génie mécanique à l'UQTR.

La comparaison de résultats de l'essai permettra ensuite de mettre une méthode d'évaluation des performances énergétiques des engrenages en évaluant le rendement via les performances tribomécaniques. Ce dernier aspect pourrait être abordé dans d'autres mémoires.

3.6.2.1 – Schéma de principe et principe de fonctionnement de l'essai

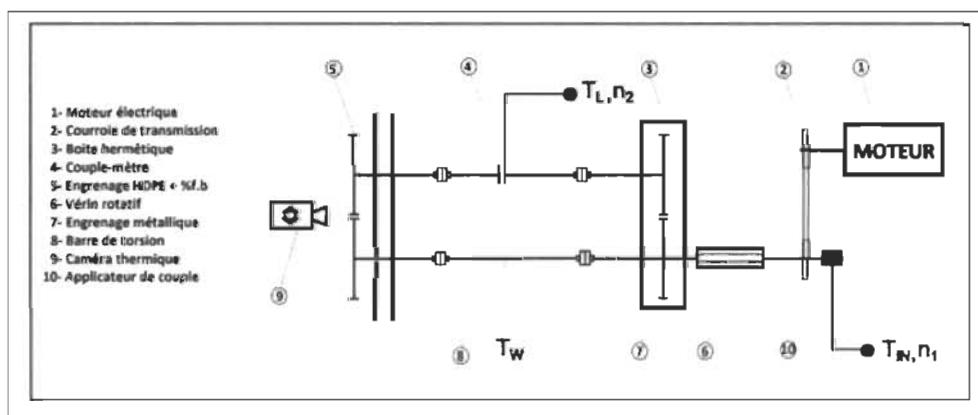


Figure 3.27 : Schéma de principe d'un banc d'essai thermomécanique

Le banc d'essai à engrenages du laboratoire de génie mécanique à l'UQTR est un ensemble d'éléments conçus permettant de mettre en rotation deux trains d'engrenages et appliquer un couple prescrit (Fig. 3.27).

Il s'agit d'une boîte hermétique (unité esclave reliée directement au moteur) et des engrenages d'essai (unité de test), les deux unités sont reliées entre elles par un arbre avec cardan et un arbre de torsion équipé d'un vérin rotatif permettant l'application hydraulique d'un couple statique dans la direction de rotation, le couple est mesuré par le couple-mètre en continu.

L'unité esclave contient un pignon et une roue menée métalliques identiques lubrifiés automatiquement avec un filet d'huile. L'unité de test se compose de deux supports sur les extrémités des deux arbres destinés à recevoir les éprouvettes d'engrenages à dentures droites d'essai.

Un moteur électrique (Louis Allis, Type PJMX, 575 V, 3 H P) transmet le mouvement rotatif via l'unité esclave à l'unité de test. Le variateur de vitesse Cleveland installé sur le banc d'essai (Séries 66A, size 6K42M) et couplé au moteur permet d'effectuer des essais à différentes vitesses.

Les figures 3.28 et 3.29 montrent respectivement le banc d'essai à engrenages, la caméra thermique et un exemple de l'imagerie thermique mesurée au cours d'un test.



Figure 3.28 : Ordinateur de contrôle et banc d'essai des analyses thermomécanique

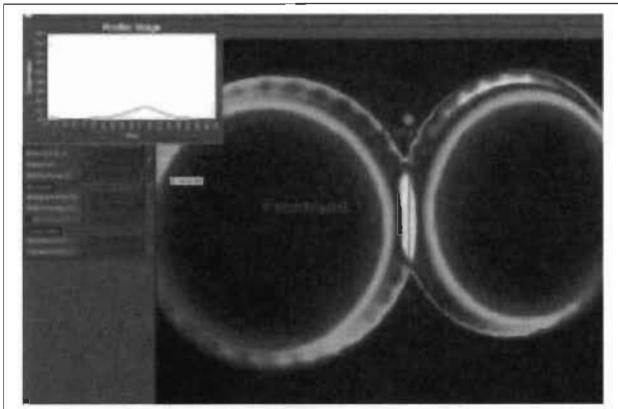


Figure 3.29 : Imagerie thermique obtenue

3.6.2.2 – Plan d’expérience : essais de traction

Les conditions expérimentales sont les mêmes pour les cinq types de matériaux et de pourcentages à étudier : trois valeurs de vitesse de rotation à savoir 500 tr/min, 1000 tr/min, et 1500 tr/min et quatre couples différents 2 Nm, 4 Nm, 5 Nm, et 6 Nm. Les essais se sont déroulés à sec (sans aucune lubrification), à la température ambiante de 22 ± 2 °C.

Tableau 3.8 : Exemple de plan d’expérience d’engrenages des essais thermomécaniques

Vitesse Couple	500 tr/min	1000 tr/min	1500 tr/min
2 Nm	R1/P2	R3/P4	R5/P6
4 Nm	R7/P8	R9/P10	R11/P12
5 Nm	R13/P14	R15/P16	R17/P18
6 N.m	R19/P20	R21/P22	R23/P24

Avec :

R : roue menée

P : Pignon

3.6.2.3 – Mesures d'usure, et de couple

L'usure est mesurée indirectement en enregistrant le poids de chaque éprouvette avant et après le test avec une balance dont la précision est de l'ordre de $\pm 10^{-3}$ g. Il convient de noter que l'usure est donnée par la réduction du poids des deux roues dentées qui ont subi le test, et non par le volume de matériau enlevé, comme c'est la procédure normale pour enregistrer les mesures d'usure.

Le couple et la durée de test sont contrôlés et enregistrés par un logiciel en boucle fermée dans une interface LabVIEW de National Instruments. L'écran de l'ordinateur fournit un graphique continu du couple au fur et à mesure que le test se déroule, en temps réel. Comme les tests durent parfois quatre heures, il faut rafraîchir l'écran périodiquement.

3.6.2.4 – Mesures thermiques

La température a été mesurée à l'aide d'une caméra thermique FLIR A35. Cette caméra peut lire des températures de -25 °C à 136 °C pour une zone de 320 à 256 pixels à une fréquence de rafraîchissement de 60 Hz.

Les engrenages testés étaient montés de sorte que la caméra puisse lire leurs faces latérales. Les faces des engrenages testés ont été peintes avec de la peinture noire. Le but de cette manœuvre est de garantir un champ de vision complet de la caméra pour éviter les réflexions. La température de l'engrenage peut varier en fonction du point de mesure, de sorte que la température utilisée dans cette étude était la température maximale pour toute l'image thermique de la zone près du contact entre les dents d'engrenage.

3.6.3 – Essais de tribologie sur les éprouvettes de rondelles

Les essais normalisés de tribologie sur éprouvettes pour la caractérisation du comportement tribomécanique (échauffement et usure) sont effectués par au laboratoire du génie mécanique de l'UQTR avec le tribomètre TE53 de la compagnie PLINT PARTNER.

Cette partie d'étude expérimentale consiste en des tests de frottement des échantillons normalisés en contact de roulement / glissement combiné.

Ces essais ont pour but de mesurer la perte de masse et de déterminer l'évolution de coefficient du frottement et de l'échauffement des éprouvettes.

3.6.3.1 – Schéma de principe et principe de fonctionnement d'un test de tribologie.

Un boîtier de roulement porte deux arbres parallèles. L'arbre inférieur porte une bague à profil plat ou un galet et est relié à un moteur réducteur à courant alternatif avec variateur de fréquence à variateur de vitesse.

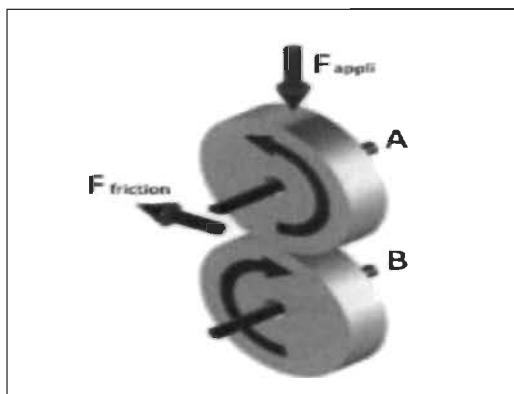


Figure 3.30 : Principe de fonctionnement de la mesure du coefficient de friction [52]

Les deux éprouvettes sont installées sur deux arbres parallèles. L'arbre inférieur est supporté par des paliers lisses et a un axe fixe. L'arbre supérieur est monté sur des roulements sphériques et peut pivoter autour de la ligne de contact du pignon avec un rayon de pivot de 100 mm. L'arbre supérieur est donc libre de se déplacer sur l'axe vertical et l'axe horizontal. Une charge est appliquée à l'arbre supérieur par l'entremise d'une épingle qui restitue la force de la charge appliquée suivant l'axe vertical.

Les poids morts sont placés sur le support de poids de l'épingle destinés à cet effet avec un rapport de levier de bras de charge de 5:1, ainsi 10 N appliqués sur le support de poids appliquent une charge de 50 N sur l'échantillon. Le bras de chargement peut être levé et replié sur l'arrière de la machine pour accéder aux disques éprouvette.

Le mouvement horizontal de l'arbre est restreint par une jauge de contrainte d'effort. Celle-ci permet de mesurer les forces tangentielles dans le contact qui sont toujours dans la même direction.

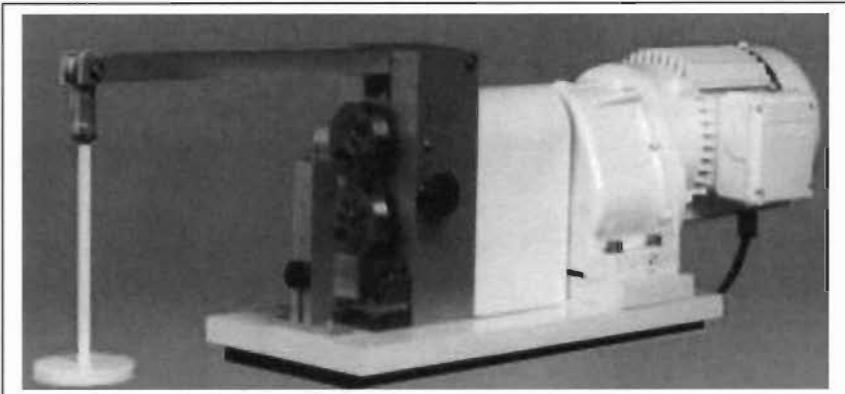


Figure 3.31 : Tribomètre TE53 de Plint PARTNER [52]

3.6.3.2 – Variables des tests

Ce test fait intervenir plusieurs variables qui permettent de décrire le comportement de chaque composition de mélange composite à savoir :

- Charges appliquées en Newton : (199, 302, 449)
- Taux de glissement en % (22.22)
- Vitesse de rotation en tours/minute (200, 500, 800)
- Temps d'un test en secondes (14400)

Par ailleurs pour la détermination du volume d'usure, on peut le calculer en faisant le rapport de la variation de masse de matière avant et après le test, par la densité.

3.6.3.3 – Plan d'expérience : essais de tribologie

Pour notre expérience ou essais de tribologie, quatre taux de glissement étaient sélectionnés comme présenté dessus dans le tableau 3.8 ci-dessous pour définir les pignons qui doivent être montés sur les arbres A et B de tribomètre TE53.

Une vitesse de rotation constante de 850 tr/min était choisie pour tous les tests. Au cours de l'essai, on observe une variation de la force normale appliquée sur les éprouvettes ; trois valeurs de la force normale ont été choisies 238 N, 287 N, 336 N.

Tableau 3.9 : Exemple de plan d'expérience pour l'essai de tribologie [66]

F_{appli.} S (taux de glissement)	238 N	287 N	336 N
1.79 %	D ₁ /d ₂	D ₃ /d ₄	D ₅ /d ₆
5.13 %	D ₇ /d ₈	D ₉ /d ₁₀	D ₁₁ /d ₁₂
10.53 %	D ₁₃ /d ₁₄	D ₁₅ /d ₁₆	D ₁₇ /d ₁₈
22.22 %	D ₁₉ /d ₂₀	D ₂₁ /d ₂₂	D ₂₃ /d ₂₄

3.6.3.4 – Acquisition des données

Avant de démarrer une séquence d'essai sur TE53, c'est très important de créer un fichier de données ou en sélectionner un déjà existant en utilisant le menu « Data File » et « Open Data File » dans le panneau de contrôle de la séquence d'essai.

Si un fichier de données a été sélectionné, l'entête de la séquence d'essai est affiché pour que l'utilisateur remplisse les informations requises sur la partie droite de l'entête.

Une fois l'entête complété, en cliquant sur « OK », la séquence débute, l'état de l'essai (« TEST STATUS ») dans la barre de menu de la fenêtre principale de Compend 2000 est « TEST RUNNING ».

La séquence se déroule jusqu'à ce que l'étape ayant « EXIT » dans la séquence d'essai soit exécutée, ou que l'essai soit interrompu soit par un seuil de sécurité configuré dans la séquence d'essai soit par appui sur le bouton « STOP ».

La séquence d'essai se déroule comme programmée dans la fenêtre de visualisation de l'essai, sauf si l'utilisateur met en pause la séquence en cliquant sur le bouton « PAUSE ».

». Pause, interrompt l'horloge de l'essai et gèle les consignes et les taux d'application dans leurs états.

Un graphique en temps réel se réinitialise automatiquement au début de l'essai lorsque le bouton START est sélectionné. En fin d'essai, le graphique s'arrête permettant ainsi d'être imprimé.

Une fois l'essai terminé, le fichier de données est automatiquement fermé.

Les données (vitesse, force, coefficient de frottement, etc.) peuvent être visualisées sous Excel à partir de deux menus. Dans la fenêtre de contrôle de l'essai ou dans la fenêtre principale de Compend 2000, en sélectionnant dans les deux cas le menu « Data File » et ensuite « View

Data File in Excel ». La liste des fichiers de données sauvegardés est affichée et le fichier sélectionné est ensuite ouvert dans Excel.

Les fichiers sont enregistrés dans un format TSV (données séparées par tabulation) qui est compatible avec Excel.

Les résultats obtenus permettent de comparer les différents paramètres mesurés et de les étudier par la suite.

Les différents résultats obtenus seront présentés en détail dans le chapitre 5 avec une discussion critique sur les différents résultats en fonction des paramètres tels que :

- La variation de la perte de masse en fonction des matériaux ;
- La variation de la perte de masse en fonction de la charge appliquée ;
- La variation du coefficient de frottement en fonction des matériaux ;
- La variation du coefficient de frottement en fonction des taux de glissement

CHAPITRE 4 : ANALYSES ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS

4.1 – Analyses et interprétations des résultats des essais de traction

Dans cette partie il sera question de la collecte des résultats des essais de traction obtenus. Nous présenterons les résultats en deux phases. Dans un premier temps nous allons restituer les résultats obtenus pour les mélanges composites de HDPE vierge, puis nous présenterons les résultats obtenus pour le HDPE vierge et le recyclé

Rappel du plan d'expérience des mélanges :

Tableau 4.1 : Rappel des pourcentages de mélange composites à base de HDPE vierge

Types d'éprouvettes	% fibres	%MAPE	% PE vierge
1	10	3	87
2	20	3	77
3	30	3	67
4	40	3	57

Tableau 4.2 : Rappel pourcentages de mélanges composites vierges et recyclés

Types d'éprouvettes	% fibres	%MAPE	% PE vierge	% PE recyclé
1 (mélange 24)	0	3	0	97
2 (mélange 21)	20	3	7	70
3 (mélange 23)	30	3	40	27
4 (mélange de 1 à 5)	30	3	13	54
5 (mélange de 16 à 20)	35	3	14	48
6 (mélange de 6 à 10)	40	3	51	6
7 (de 11 à 15 et le 22)	35	3	50	12

Toutefois, pour chacun de ces mélanges, on a fabriqué au moins cinq éprouvettes identiques afin de répéter les essais à de multiples reprises pour nous assurer de la fiabilité des résultats.

4.1.1 – Cas des éprouvettes en composites de HDPE vierge

Les résultats obtenus sont les suivants :

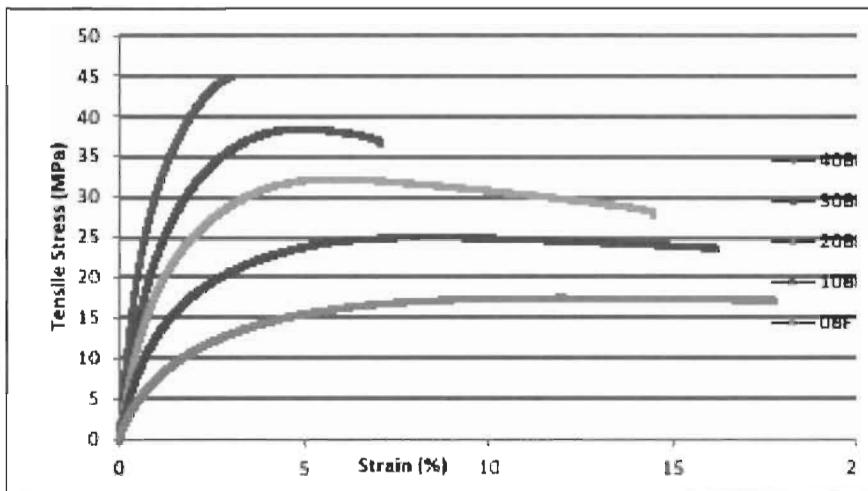


Figure 4.1 : Courbes contraintes - déformations du test de traction pour les composites à base de fibres de bouleau et de polyéthylène vierge

D'après la figure 4.1, présentant l'impact du pourcentage de fibre sur la courbe contrainte-déformation pour chaque pourcentage de mélange, on constate que l'augmentation de la quantité de fibres entraîne une augmentation de la contrainte maximale et de la rigidité des matériaux ainsi qu'une diminution de la déformation à la rupture. La diminution de la déformation à la rupture est la conséquence d'une mobilité moindre des molécules dans la matrice polymère.

Par ailleurs on constate que, le module élastique et la résistance de traction augmente linéairement avec le pourcentage de fibres. $R^2 = 0,9618$ pour le module de traction et $R^2 = 0,999$ pour la résistance à la traction. Pour un pourcentage de fibres qui varie de 0% à 40% de fibre de bouleau, on note une variation de 1,51 à 4,39 GPa pour le module de traction et de 18,8 à 45,54 MPa pour la résistance à la rupture en traction. L'augmentation significative de la résistance à la traction et du module est due non seulement à la teneur en fibres, mais également à une meilleure adhérence entre la fibre et la matrice [1, 4, 5, 6] avec l'ajout de l'agent de couplage.

Le tableau 4.3 présente les résultats obtenus pour les essais de traction sur les éprouvettes HDPE vierge/fibres de bouleau.

Tableau 4.3 : Module élastique et contraintes de traction pour les composites fibre de bouleau/HDPE vierge

Éprouvettes	% fibres	%MAPE	% PE vierge	Module élastique (GPa)	Contrainte de traction (MPa)
1	10	3	87	1,66	25,08
2	20	3	77	2,67	32,47
3	30	3	67	3,37	38,33
4	40	3	57	4,39	45,54

La figure 4.3 montre les effets du pourcentage de fibres sur le module élastique des composites HDPE / bouleau avec 3% en poids de MAPE. En ordonné nous avons les pourcentages de fibres et la droite de régression présente l'évolution du module par rapport au pourcentage de fibres.

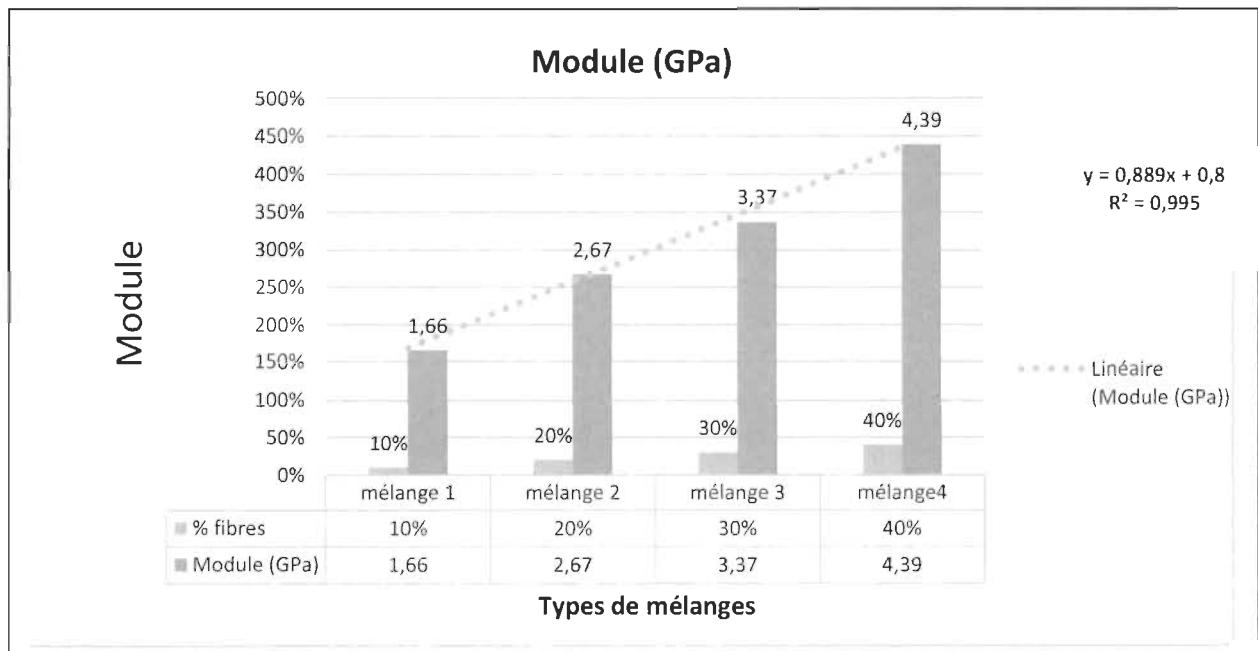


Figure 4.2 : évolution du module élastique par rapport aux types de mélanges

La figure 4.3 montre les effets du pourcentage de fibres sur la résistance à la traction des composites HDPE / bouleau avec 3% en poids de MAPE. Nous avons les contraintes en ordonné et les la droite de régression présente l'augmentation de la résistance en traction en fonction du pourcentage de fibre dans le mélange.

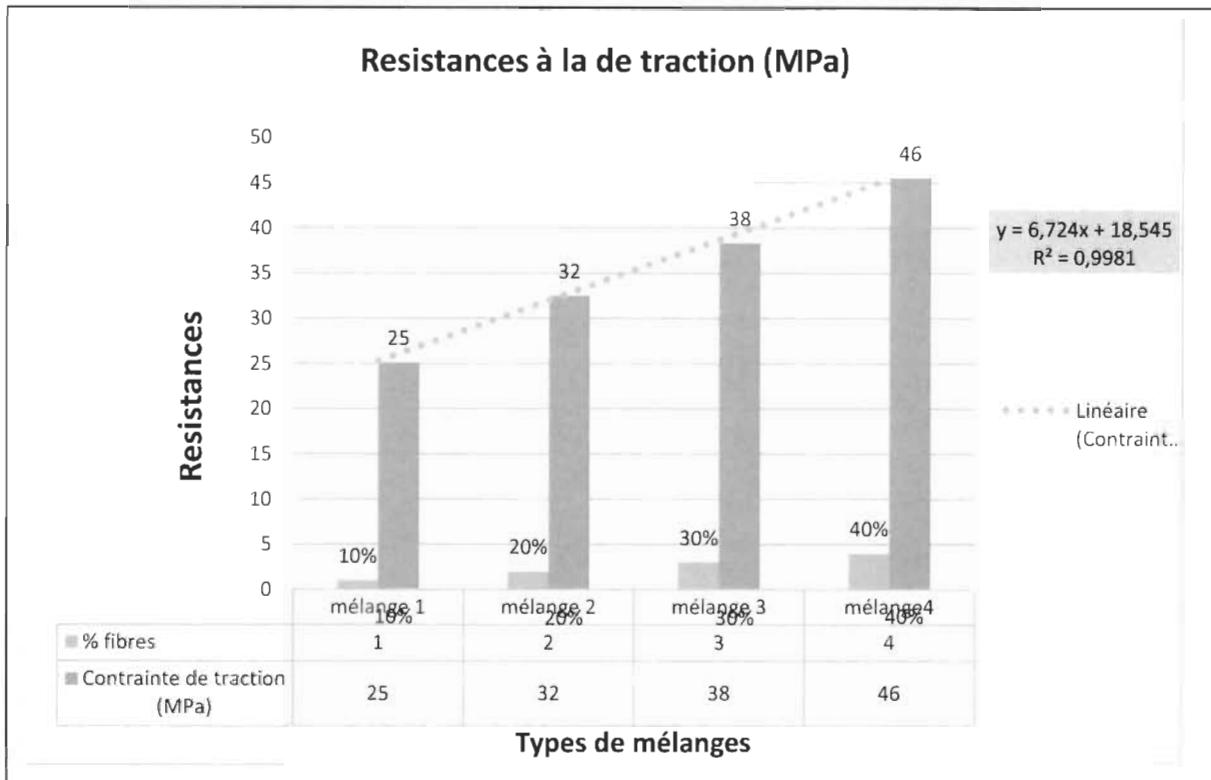


Figure 4.3 : Evolution de la contrainte de traction par rapport aux types de mélanges

4.1.2 – Cas des éprouvettes composites de HDPE vierge et HDPE recyclés

Plusieurs essais ont été effectués par pourcentages de mélanges et le tableau 4.4 restitue les valeurs moyennes des différents essais par groupe de pourcentages de mélange HDPE vierge et recyclé identiques.

Tableau 4.4 : Résultats obtenus par pourcentage de mélange

Mélanges	% fibres	%MAPE	% PE vierge	% PE recyclé	Module élastique (GPa)	Contrainte de traction (MPa)
1 (mélange 24)	0%	3	0	97%	1,148	23,95
2 (mélange 21)	20%	3	7	70%	1,148	23,94
3 (mélange 23)	30%	3	40	27%	1,613	27,40
4 (mélange de 1 à 5)	30%	3	13	54%	1,73525	29,57
5 (mélange de 16 à 20)	35%	3	14	48%	2,5368	48,73
6 (mélange de 6 à 10)	40%	3	51	6%	2,9114	57,76
7 (de 11 à 15 et le 22)	35%	3	50	12%	3,114	54,69

La figure 4.4 présente les différentes variations de modules pour les composites HDPE recyclés/fibres naturelles à différents pourcentages de mélanges. En ordonné nous avons les pourcentages de fibres et la droite de régression présente l'évolution du module par rapport au pourcentage de fibres.

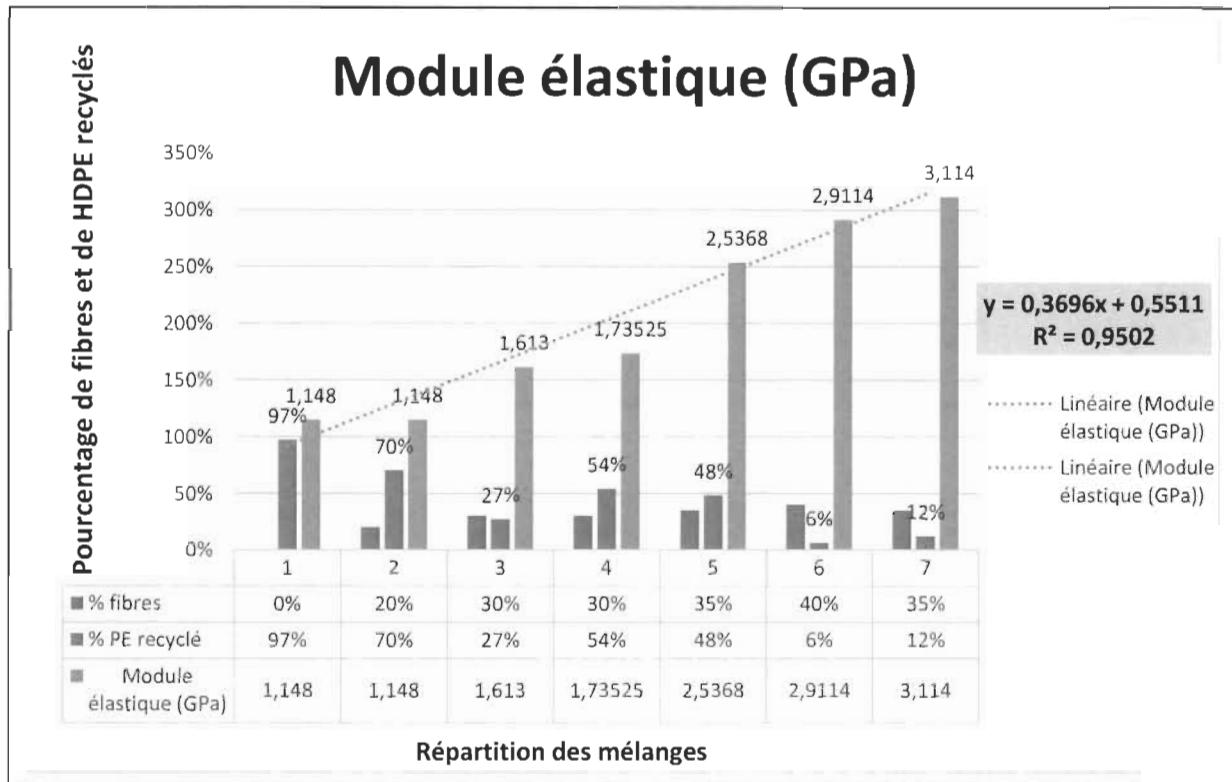


Figure 4.4 : Diagramme de variation du module en fonction des pourcentages de HDPE vierge et recyclé

La figure 4.5 présente les différentes variations de contraintes de rupture en traction pour les composites HDPE recyclés/fibres naturelles à différents pourcentages de mélanges. En ordonné nous avons les pourcentages de fibres et la droite de régression présente l'évolution du résistance en traction par rapport au pourcentage de fibres.

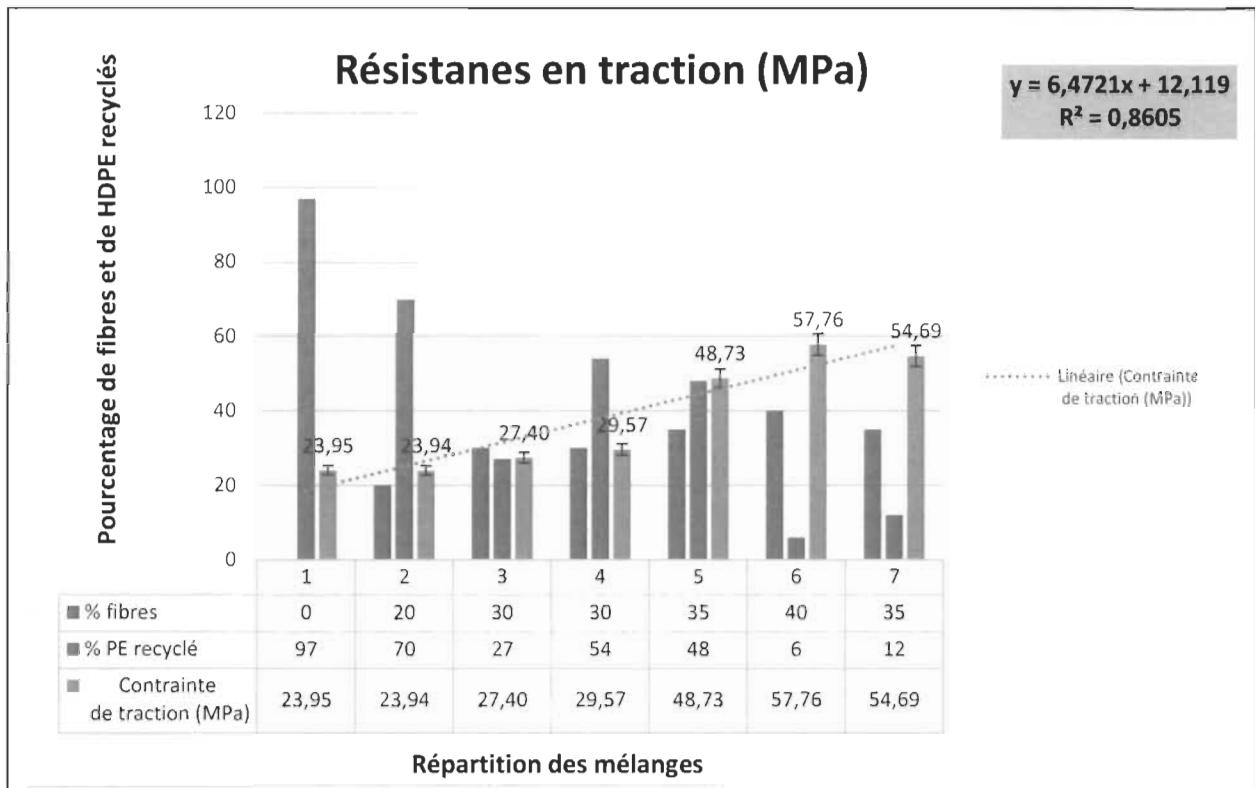


Figure 4.5 : Diagramme de variation de la contrainte en fonction des pourcentages de HDPE vierge et recyclé

Dans l'un comme dans l'autre des diagrammes de variations de modules de de contraintes, on constate d'une part que le module élastique est inversement proportionnel au pourcentage de polyéthylène recyclé pour chacun des mélanges. En effet, le polyéthylène recyclé présente des propriétés mécaniques réduites à cause du recyclage. Ceci entraîne une baisse du module élastique lorsqu'il a un pourcentage supérieur ou égal au pourcentage de polyéthylène vierge.

Toutefois, dans les deux cas, le module et la contrainte augmentent proportionnellement avec le pourcentage de fibre.

D'un autre côté, on note qu'avec un pourcentage de HDPE recyclé compris entre 12% et 48 % on atteint un module variant entre 2.53 GPa et 3.11 GPa. Ce qui est une bonne chose comparativement au gain en matière de HDPE vierge enlevé.

Par ailleurs d'après la figure 4.5, on constate aussi qu'une hausse de HDPE recyclé dans le mélange entraîne une baisse de performances mécaniques pour ce qui est des contraintes de traction. Ceci peut s'expliquer par la mauvaise adhérence entre la fibre et le HDPE recyclé, bien que renforcé par le MAPE.

Par contre pour un pourcentage de HDPE recyclé compris entre 12% et 48%, on note une variation tout à fait acceptable de contrainte de résistance en traction comprise entre 48,73 MPa, et 57,76 MPa.

4.1.3 – Analyse comparative des résultats des essais de traction

L'analyse des résultats des essais de traction effectués sur les composites HDPE vierges/fibres de bouleau nous montre que pour 40% de fibres dans le mélange on atteint les proportions de répartitions optimales. Ce qui conduit à un module de 4,39 GPa, et une contrainte de 45,54 MPa.

Comparativement aux composites HDPE vierges/fibres de bouleau ; les éprouvettes de composites HDPE vierge et recyclé/fibres de bouleau ont présenté des valeurs de 3,14 GPa, et de 54,69 MPa pour un mélange optimal de 35% de fibre et 12% de polyéthylène recyclé.

La figure 4.6 présente les différences obtenues pour les mélanges 100 % HDPE vierge et 100% HDPE recyclés

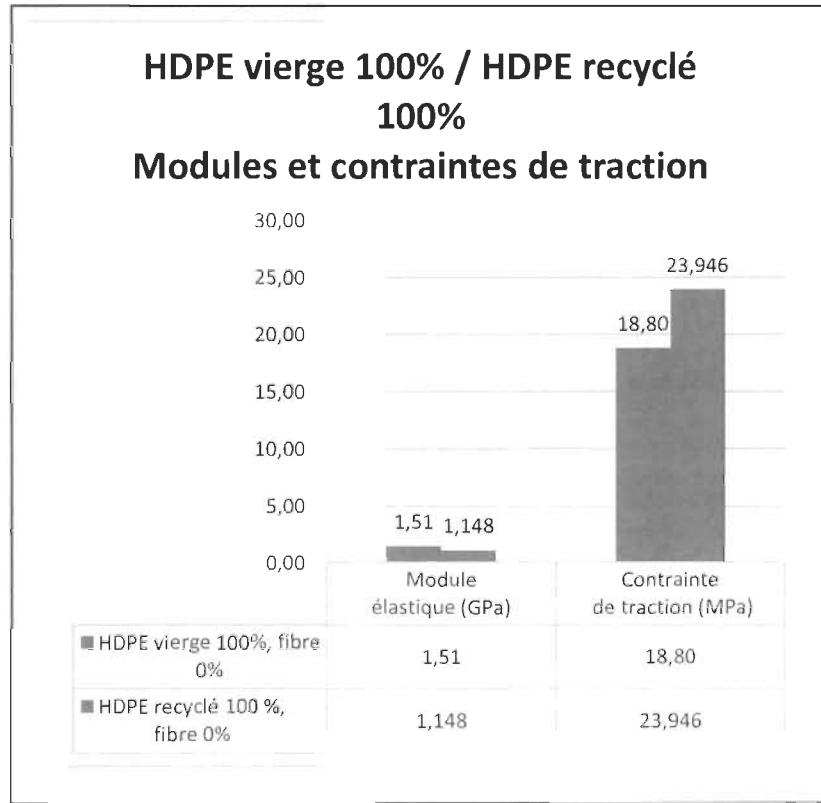


Figure 4.6 : Comparaison des essais de traction HDPE vierge 100 % et HDPE recyclé 100%

D'après le diagramme, on constate que le Polyéthylène HDPE vierge présente un module de 1,51 GPa plus élevé que celui du Polyéthylène HDPE recyclé qui est de 1,148 GPa. Par contre le composite HDPE vierge possède une contrainte en traction de 18,8 MPa beaucoup plus faible que celle du HDPE recyclé qui est de 23,94 MPa.

La figure 4.7 présente une comparaison entre les deux types de composites HDPE vierge et recyclé avec des pourcentages de fibres de 30% et 35%

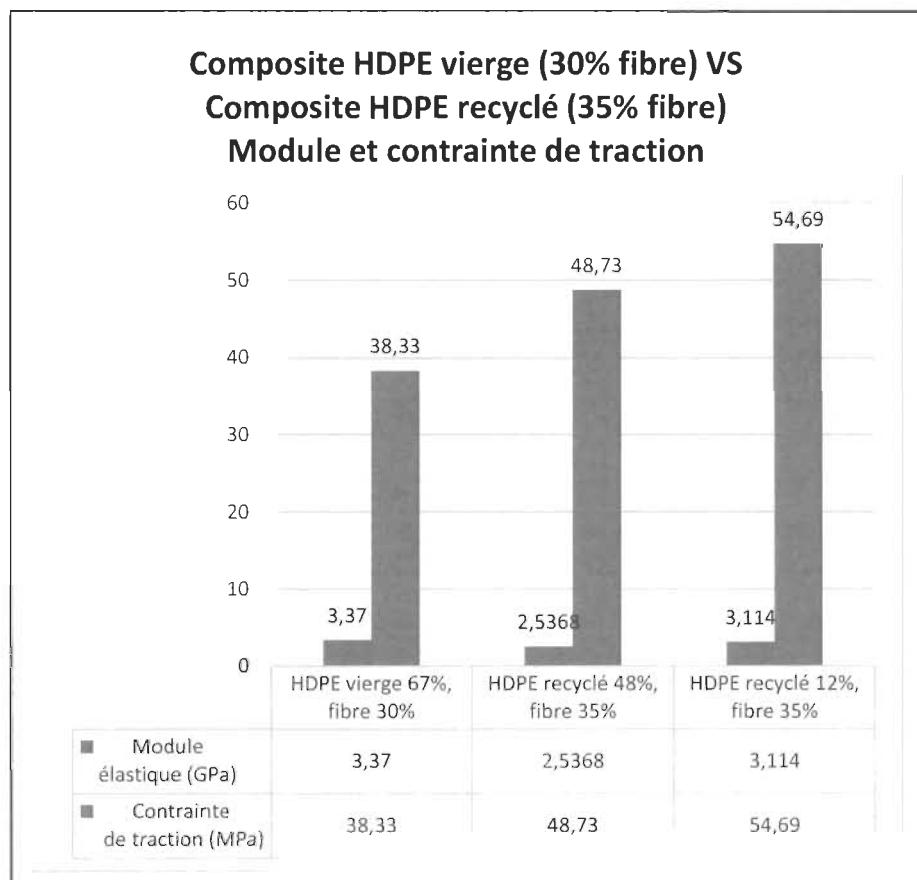


Figure 4.7 : Comparaison de modules et de contraintes de traction des composites HDPE vierge/fibres de bouleau et HPDE recyclé/fibres de bouleau à 30% et 35%

De la figure 4.7, on remarque que dans la zone de 30% à 35% de fibres, le composite HDPE vierge présente un module de 3,37 GPa, alors que le composite HDPE recyclé présente un module de 2,54 GPa et de 3,14 GPa. Donc il est clair que même si le module du composite HDPE vierge est plus élevé, le composite HDPE recyclé a une valeur non négligeable surtout

sachant les proportions de pourcentages de HDPE vierge et recyclé dans l'éprouvette du mélange.

Par contre, pour la contrainte, de traction on observe le phénomène inverse. Le composite HDPE vierge présente une contrainte de traction de 38,33 MPa, tandis que les deux autres composites HDPE recyclés ont une contrainte de traction de 48,73 MPa, et de 54,69 MPa.

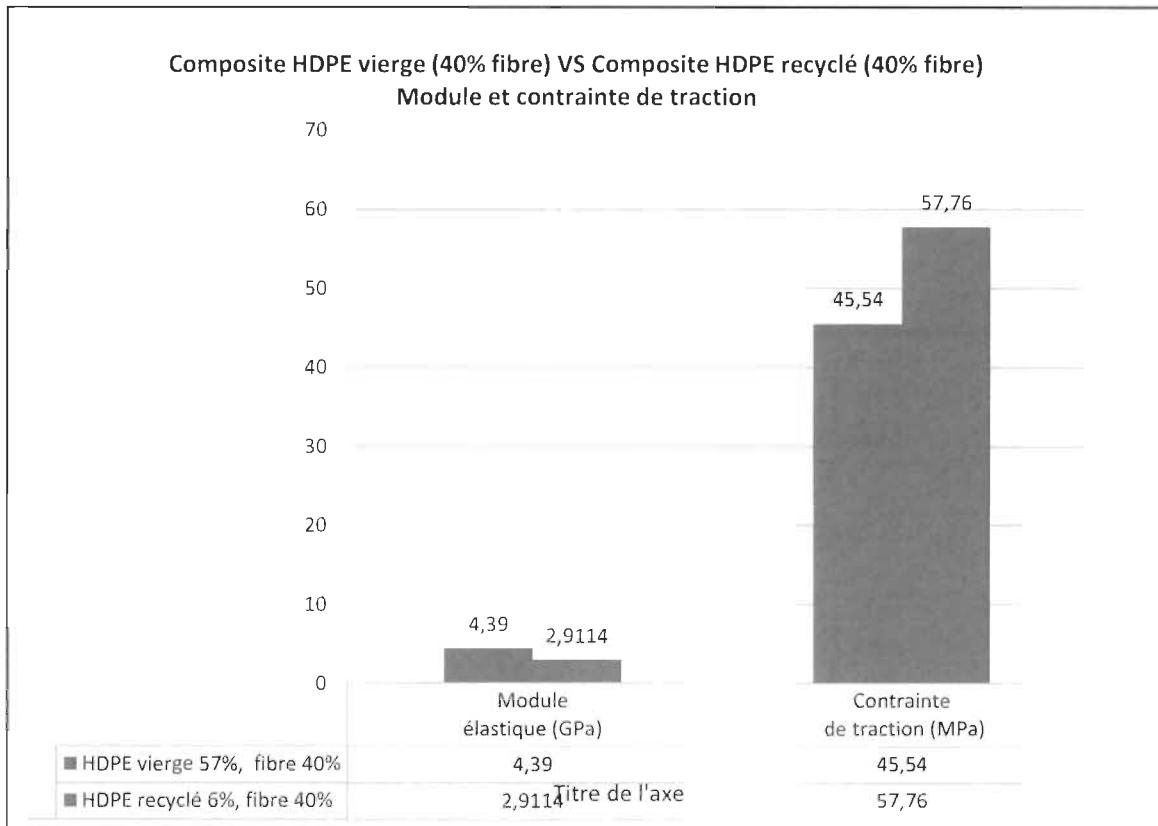


Figure 4.9 : Comparaison de modules et de contraintes de traction des composites HDPE vierge 57%/fibres de bouleau 40% et HPDE recyclé 6%/fibre de bouleau à 40%

Comparativement aux valeurs obtenues à 35% de fibres présentées précédemment, on remarque ici que le composite HDPE recyclé / fibre de bouleau à 40%, présente des caractéristiques beaucoup moins élevées. En effet pour 40% de fibres de bouleau, le composite HDPE recyclé /fibre de bouleau présente un module de 2.91 GPa , et une contrainte de traction de 57,76 MPa. Ce pendant le composite HDPE vierge/fibre de bouleau à 40% présente un module de 4.39 GPa, et une contrainte de traction de 45.54 Mpa.

Tous les essais de traction aux différents pourcentages nous ont permis non seulement d'avoir une analyse du comportement en traction des composites HDPE vierge et HDPE recyclé

pour différents pourcentages de mélanges, mais aussi d'avoir une idée sur le pourcentage de mélange optimal du HDPE recyclé/fibre de bouleau.

On peut dire que le mélange du composite HDPE vierge/recyclé/fibre de bouleau adéquat pour le module et la contrainte en traction est celui présenté dans le tableau ci-dessous

Tableau 4.5 : Pourcentages optimaux de mélange pour les composites HDPE recyclés/fibres de bouleau

Mélanges	% fibres	%MAPE	% PE vierge	% PE recyclé	Module élastique (GPa)	Contrainte de traction (MPa)
7 (de 11 à 15 et le 22)	35%	3	50	12%	3,114	54,69

4.2 – Analyses et interprétations des résultats des essais thermomécaniques

Dans cette partie, on traitera les résultats pertinents des tests thermomécaniques réalisés, les résultats obtenus reflètent les démarches et les montages qui ont déjà été décrits dans le chapitre précédent (chapitre III).

Ainsi, il sera question de la collecte des résultats des essais de traction obtenus. Nous présenterons les résultats en deux phases. Dans un premier temps nous allons restituer les résultats obtenus pour les mélanges composites de HDPE vierge, puis nous présenterons les résultats obtenus pour le HDPE vierge et recyclé.

Des résultats des essais de traction, nous constatons que les mélanges de 10% et de 20% de fibres dans chacun des cas de composite HDPE vierge/fibre de bouleau d'une part ; et de composite HDPE vierge et recyclé/fibres de bouleau d'autre part ne donnaient pas de bons résultats. Pour cela, nous avons choisi pour le reste des essais thermomécaniques et tribologique, de se focaliser sur les mélanges de 30% et 40% pour les composites HDPE vierges/fibres de bouleau ; et de 30%, 35% et 40% pour les composites HDPE vierge et recyclé/fibre de bouleau.

Cet essai permet de statuer sur l'évolution de la perte de masse des engrenages par types de composites en fonction de la charge appliquée. En effet on applique suivant une durée donnée une charge et on observe les variations des masses d'engrenage avant et après l'essai. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

4.2.1. – Cas des éprouvettes en composites d'engrenages HDPE vierges

4.2.1.1 – Analyse de la perte de masse à 500 tr/min

Le tableau ci-dessous présente l'intégralité des résultats des différents essais effectués à une vitesse de rotation 500 tr/min. La charge appliquée est un couple qui varie de 2 N.m à 6 N.m

Tableau 4.6 : Variation de la masse à 500 tr/min

Composite HDPE vierge/fibre de bouleau										
			Vitesse de rotation = 500 tr/min							
			masse avant [g]		masse après [g]		Perte de masse en [%]			
Charge	Mené	Menant	m. mené	m. menant	m. mené	m. menant	Δm mené	Δm menant	Δm Sav-Sap	
2 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,414	24,472	24,411	24,47	0,01229	0,00817	0,01023	
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,507	25,571	25,505	25,57	0,00784	0,00391	0,00587	
4 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,351	24,447	24,346	24,441	0,02053	0,02454	0,02254	
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,778	25,813	25,774	25,81	0,01552	0,01162	0,01357	
5 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,438	24,447	24,429	24,439	0,03683	0,03272	0,03478	
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,335	25,53	25,328	25,523	0,02763	0,02742	0,02752	
6 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,331	24,632	24,32	24,618	0,04521	0,05684	0,05106	
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,197	25,117	25,187	25,108	0,03969	0,03583	0,03776	

Avec

m = masse de la roue

Δm = variation de la masse de la roue avant et après ou perte de masse

$$\Delta m_{mené} = m_{mené\ avant} - m_{mené\ après}$$

$$\Delta m_{menant} = m_{menant\ avant} - m_{menant\ après}$$

$$\Delta m (S_{av} - S_{ap}) \% = \frac{(\Delta m_{mené} + \Delta m_{menant}) * 100}{m_{mené} + m_{menant}} \quad (4.1)$$

S_{av} = somme des masses de la paire des roues avant l'essai

S_{ap} = somme des poids de la paire des roues après l'essai

Sous sa forme graphique, la variation des masses obtenues se présente ainsi :

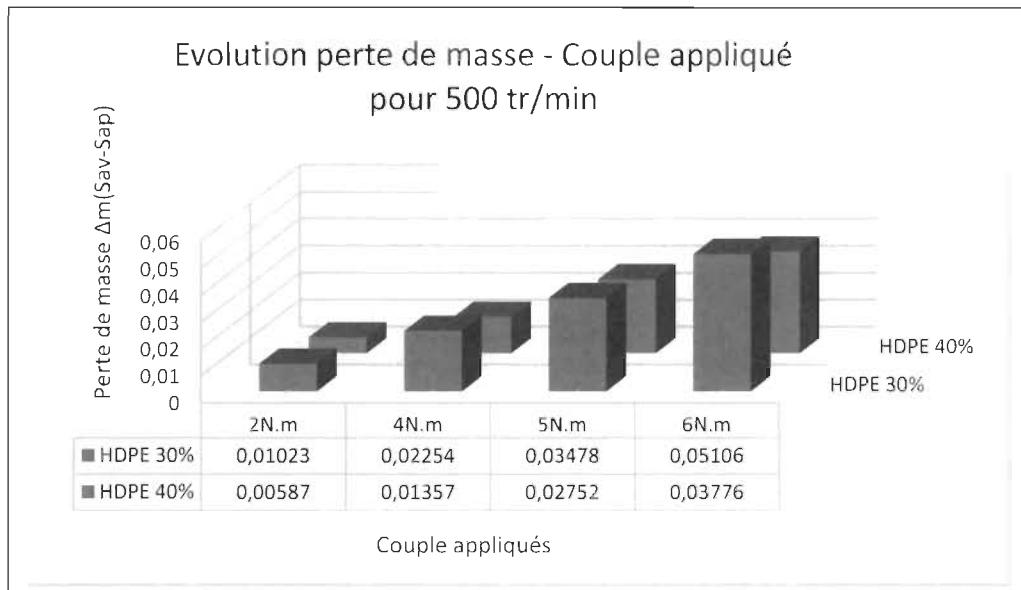


Figure 4.10 : Variation de la perte masse en fonction de la charge appliquée à 500 tr/min pour les composites HDPE vierges/fibre de bouleau

D'après le graphe de la figure 4.10, on peut dire que la variation ou perte de masse augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres, et avec l'augmentation du couple appliquée pour les composites HDPE vierges/fibre de bouleau.

En effet pour un couple de 2N.m à 6N.m elle varie de 0.01023% à 0.05106% pour les composites HDPE à 40% de fibres, et de 0.00587% à 0.03776% pour les composites HDPE à 30% de fibres.

Cela étant, les valeurs maximales de pertes de masses sont obtenues à 6Nm, respectivement 0.05106% et 0.03776% pour les composites HDPE vierges avec 30% et 40% de fibre. On peut en déduire que le pourcentage de fibre diminue la perte masse.

4.2.1.2 – Analyse de la perte de masse à 1000 tr/min

Le tableau ci-dessous présente l'intégralité des résultats des différents essais effectués à une vitesse de rotation 1000 tr/min.

Tableau 4.7 : Variation de la masse à 1000 tr/min

Composite HDPE vierge/fibre de bouleau										
			Vitesse de rotation = 1000 tr/min							
			masse avant [g]		masse après [g]		Perte de masse en [%]			
Couple	Mené	Menant	m. mené	m. menant	m. mené	m. menant	Δm mené	Δm menant	Δm Sav- Sap	
2 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,616	24,598	24,606	24,59	0,04062	0,03252	0,03657	
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,751	25,581	25,746	25,574	0,01942	0,02736	0,02338	
4 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,542	24,46	24,534	24,45	0,0326	0,04088	0,03673	
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,756	25,644	25,748	25,634	0,03106	0,039	0,03502	
5 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,478	24,513	24,337	24,504	0,57603	0,03672	0,30618	
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,485	25,636	25,34	25,627	0,56896	0,03511	0,30125	
6 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,855	24,653	24,716	24,645	0,55924	0,03245	0,29692	
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,964	25,676	25,801	25,662	0,62779	0,05453	0,34276	

Le tracé de la variation de la perte de masse en fonction du couple et du taux de fibre nous donne :

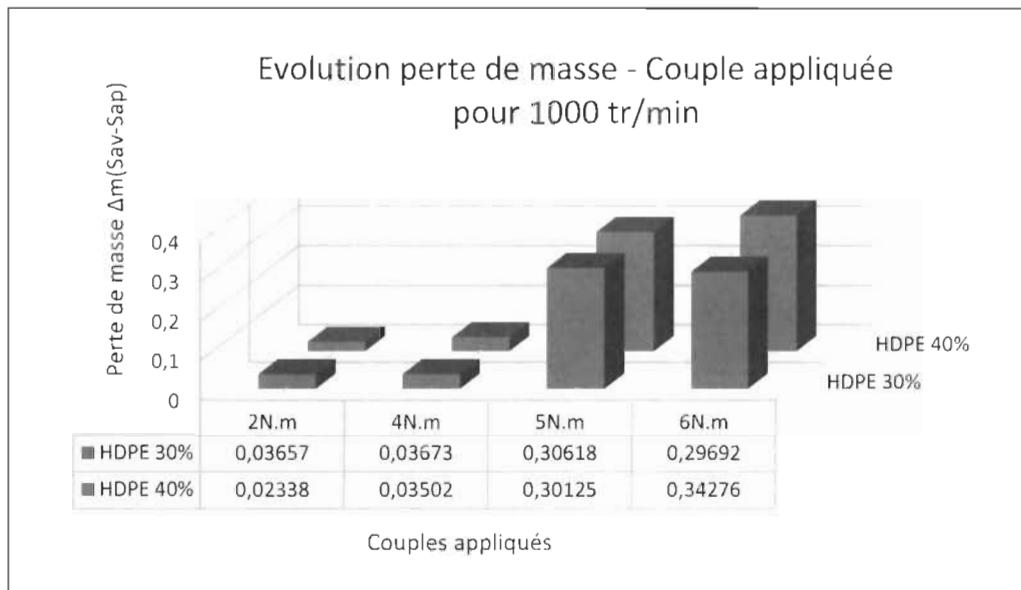


Figure 4.11 : Variation de la perte masse en fonction du couple appliqué et du pourcentage de fibres à 1000 tr/min pour les composites HDPE vierges/fibre de bouleau

D'après le graphe de la figure 4.11, on peut dire que pour le cas des vitesses de 1000 tr/min, que la variation de masse augmente avec le pourcentage de fibres pour les composites HDPE vierge/fibre de bouleau, et qu'elle augmente aussi avec l'augmentation du couple appliqué.

En effet la perte de masse se fait moins ressentir pour des pourcentages de fibres élevés. Toutefois, elle augmente de façon significative avec l'augmentation de couple appliqué. Cependant, on remarque que pour des vitesses de rotation de l'ordre de 1000 tr/min, la variation de la perte de masse augmente à des valeurs relativement plus élevées.

4.2.1.3 – Analyse de la perte de masse à 1500 tr/min

Le tableau 4.8 présente les résultats obtenus pour les engrenages menants et menés durant des essais effectués avec une vitesse de rotation de 1500 tr/min.

Tableau 4.8 : Variation de la masse en fonction du couple pour une vitesse de 1500 tr/min

			Composite HDPE vierge/fibre de bouleau						
			Vitesse de rotation = 1500 tr/min						
			masse avant [g]		masse après [g]		Perte de masse en [%]		
Couple	Mené	Menant	m. mené	m. menant	m. mené	m. menant	Δm mené	Δm menant	Δm Sav-Sap
2 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,376	24,43	24,367	24,421	0,03692	0,03684	0,03688
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,696	25,232	25,688	25,225	0,03113	0,02774	0,02945
4 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,569	24,545	24,414	24,536	0,63088	0,03667	0,33392
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,552	25,822	25,401	25,814	0,59095	0,03098	0,3095
5 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,618	24,263	24,464	24,257	0,62556	0,02473	0,32733
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,266	25,442	24,961	25,358	1,20716	0,33016	0,76714
6 N.m	HDPE 30%	HDPE 30%	24,61	24,298	24,468	24,246	0,577	0,21401	0,39666
	HDPE 40%	HDPE 40%	25,942	25,747	25,785	25,665	0,6052	0,31848	0,46238

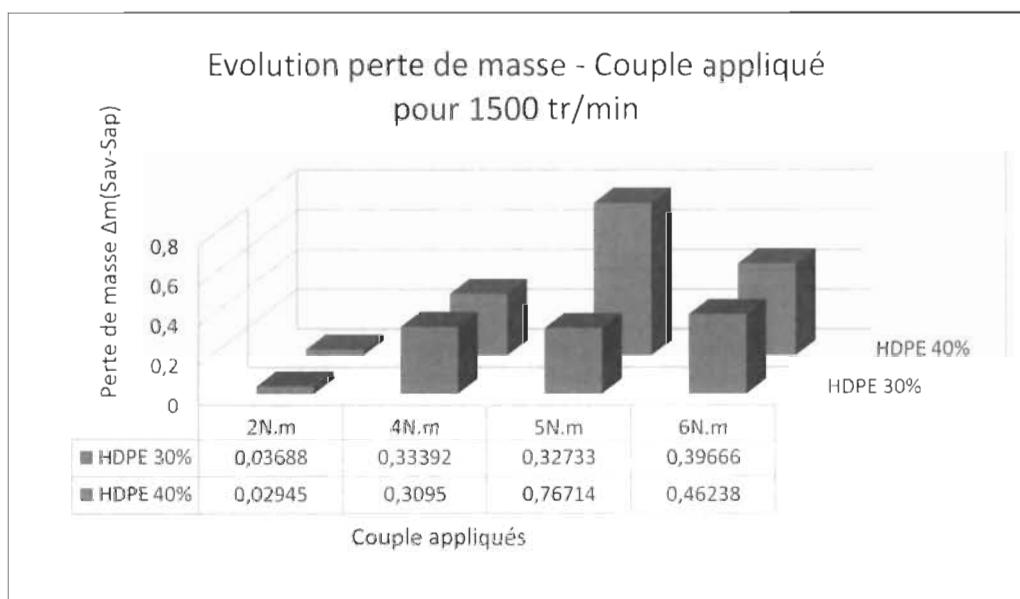


Figure 4.12 : Variation de la perte masse en fonction de la charge appliquée et du pourcentage de fibres à 1500 tr/min pour les composites HDPE vierges/fibre de bouleau

D'après le graphe de la figure 4.12, on voit un comportement différent de l'évolution de la perte de masse par rapport aux évolutions précédentes. En effet à 2N.m et à 4N.m, la perte

de masse semble diminuer avec le pourcentage de fibres. C'est-à-dire qu'elle varie de 0,03688% et 0,02945% à 0,33392 et 0,3095, respectivement pour 30% et 40% de fibres.

Cependant de 5N.m à 6N., elle augmente avec le pourcentage de fibres, variant de 0,32733% et 0,76714% à 0,39666% et 0,46238% respectivement pour 30% et 40% de fibres.

4.2.1.4 – Récapitulatif des pertes de masses obtenues pour le HDPE vierge/fibre de bouleau pour les vitesses de 500 tr/min, 1000 tr/min, et 1500 tr/min

La figure 4.13 ci-dessous donne un aperçu général de tous les résultats groupés en un seul diagramme et donnant une appréciation globale du comportement de la perte de masse.

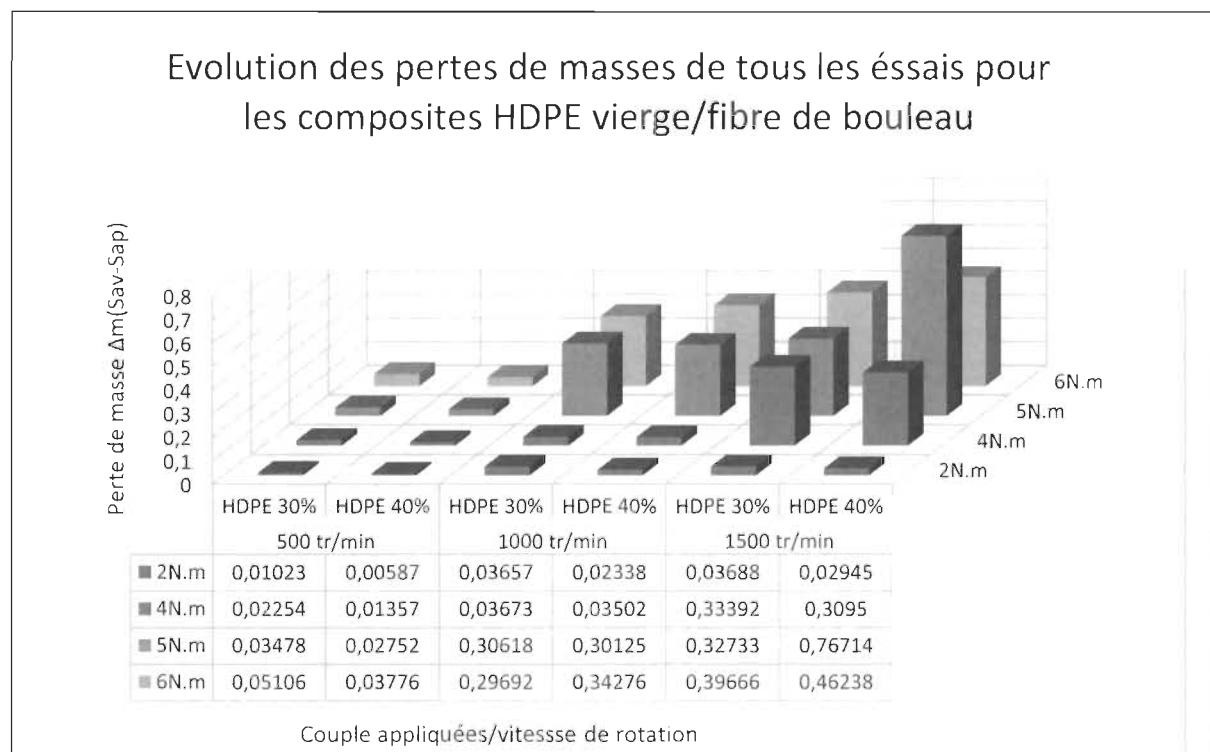


Figure 4.13 : Récapitulatif de l'évolution des pertes de masse pour toutes les valeurs de vitesses de rotation de l'essai

D'une manière générale, on peut dire à travers ce tableau que la perte de masse augmente avec le pourcentage de fibres, avec le couple appliqué et la vitesse de rotation des engrenages. On note des pics de pertes de masse pour le couple de 4N.m.

4.2.1.5 – Analyse des pertes de couple et du comportement thermique obtenu

4.2.1.5.1 – Analyse des pertes de couples

En ce qui concerne les engrenages HDPE vierges/fibres de bouleau, le tableau 4.9 ci-dessous présente les résultats obtenus lors des essais.

Tableau 4.9 : Pourcentage de couple maintenu à la fin de l'essai pour les composites HDPE vierge/fibres de bouleau

		2 Nm	4 Nm	5 Nm	6 Nm
HDPE 30%	500 tr/min	89,6%	87%	78%	97%
	1000 tr/min	88%	96%	78%	85%
	1500 Tr/min	89%	95%	95%	94%
HDPE 40%	500 tr/min	95%	97%	93%	96%
	1000 tr/min	93%	97%	95%	93%
	1500 Tr/min	97%	95%	93%	96%

D'après le tableau, on peut voir que pour chacune des vitesses, le pourcentage de maintien de couple croît avec l'augmentation du couple appliqué. En effet les valeurs montrent que le pourcentage de maintien de couple à 6 Nm est plus élevé qu'à 2 Nm pour chaque pourcentage de fibres dans le mélange de composite.

La figure 4,14 ci-dessous, illustre le comportement du couple lors des essais :

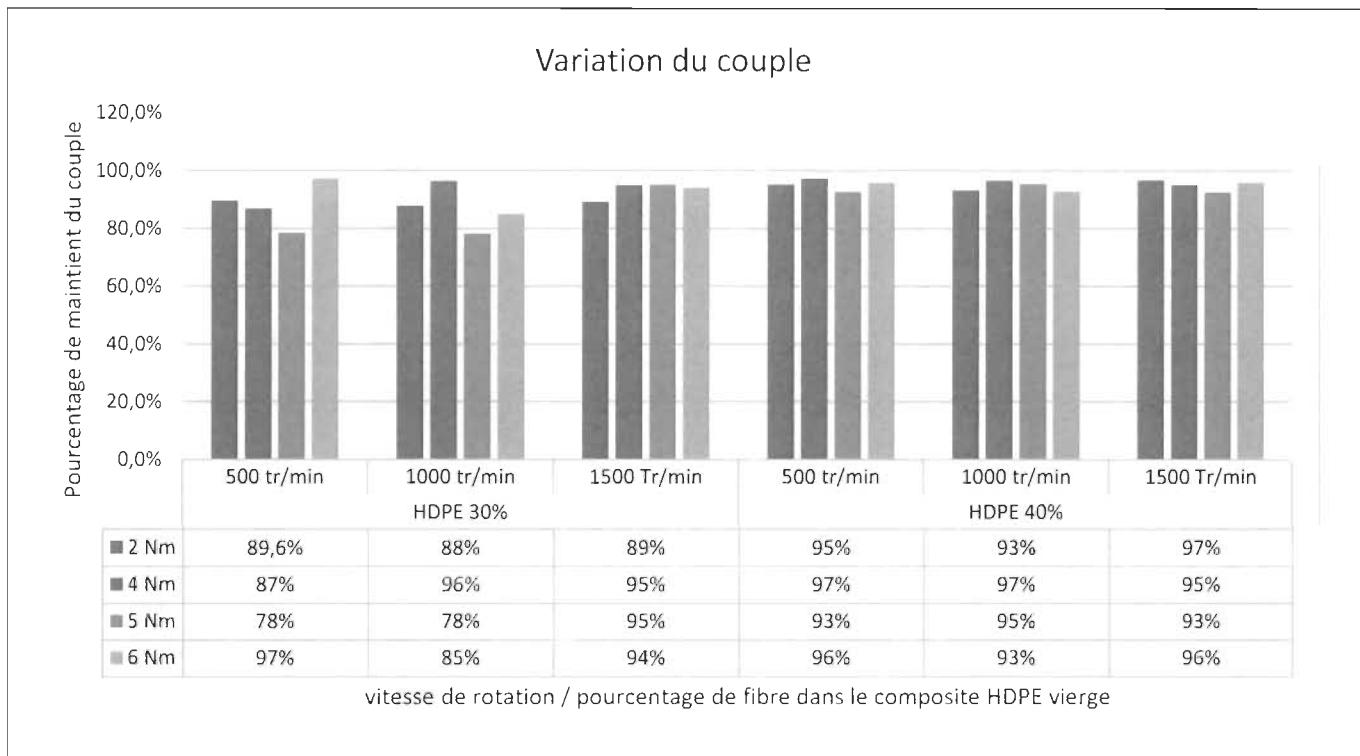


Figure 4.14 : Evolution du couple appliqué en fonction de la vitesse de rotation

D'après la figure 4,14 ; on constate que d'une manière générale, la plage de variation de perte de couple va de 3% à 22%, respectivement pour le HDPE 40% de fibres à 1000 tr/min ; et pour le HDPE 30% de fibres à 500 tr/min.

De ceci, il ressort que la perte de couple semble diminuer avec l'augmentation de la vitesse de rotation et l'augmentation du pourcentage de fibre dans le composite et aux couples initiaux appliqués.

4.2.1.5.2 – Analyse des températures

Pour les températures des engrenages HDPE vierge/fibres de bouleau ; le tableau 4,10 ci-dessous présente les résultats obtenus lors des essais.

Tableau 4.10 : Températures obtenues lors des essais de thermomécaniques HDPE/fibres de bouleau

		2 Nm	4 Nm	5 Nm	6 Nm
HDPE 30%	500 tr/min	34,7°C	41,1°C	42°C	46°C
	1000 tr/min	39,5°C	42,2°C	44,8°C	55,6°C
	1500 Tr/min	42°C	47,2°C	47,7°C	48,7°C
HDPE 40%	500 tr/min	40,7°C	42,8°C	44,3°C	43°C
	1000 tr/min	38,5°C	42,8°C	46°C	47,5°C
	1500 Tr/min	39°C	44,6°C	48,3°C	51,6°C

À première vue, les valeurs de température semblent plus élevées à 6 N. On remarque aussi que les valeurs des températures augmentent avec le couple appliqué.

La figure 4,15 ci-dessous, présente l'évolution des températures en fonction du couple et de la vitesse pour les composites HDPE 30% et 40% de fibres :

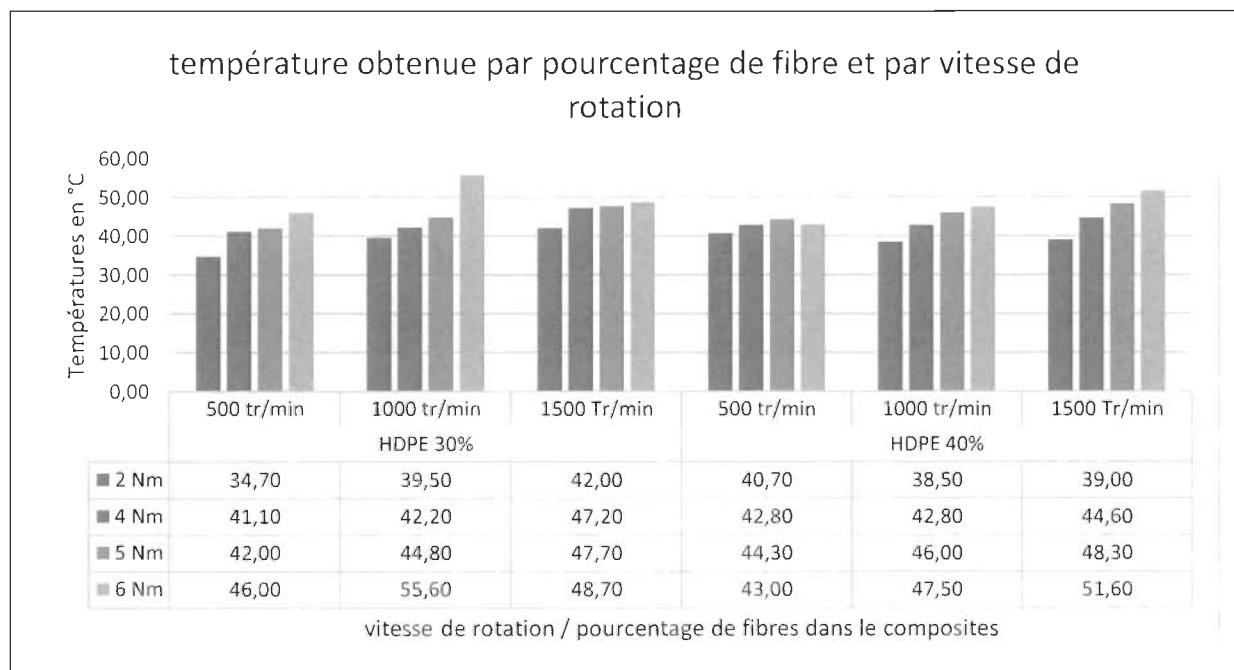


Figure 4.15 : Évolution de la température lors des essais thermomécaniques pour les composites HDPE/fibre de bouleau

D'après la figure 4,15 ; on peut affirmer que tout comme le pourcentage de maintien de couple, la température augmente avec la vitesse de rotation, le pourcentage de fibre et le couple initial appliquée.

En effet on obtient la plus haute température pour un couple de 6Nm, une vitesse de 1500 tr/min, et un mélange de 40% de fibres ; tandis que la valeur la plus faible est obtenue pour un couple de 2 Nm, une vitesse de 500 tr/min et un mélange de 30% de fibres.

4.2.2 – Cas des éprouvettes composites d'engrenages HDPE vierge, HDPE recyclé/fibres de bouleau

Pour les éprouvettes d'engrenages composites HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau, nous avons effectué trois séries de tests pour les vitesses de 500 tr/min, 1000 tr/min, 1500 tr/min

Nous présenterons les résultats obtenus pour chacun d'eux dans les sections ci-dessous, puis nous regrouperons tous les résultats en un seul tableau afin d'avoir une vue d'ensemble de l'évolution des pertes de masses desdits composites.

4.2.2.1 – Analyse de la perte de masse à 500 tr/min

Le tableau 4,11 ci-dessous présente les résultats des essais à 500 tr/min

Tableau 4.11 : Résultats des pertes de masses lors des essais de thermomécanique à 500 tr/min pour les composites HDPE vierge /HDPE recyclé/fibres de bouleau

			Vitesse de rotation = 500 tr/min							
			masse avant [g]		masse après [g]		Perte de masse en [%]			
Couple	Mené	Menant	m. mené	m. menant	m. mené	m. menant	Δm mené	Δm menant	Δm Sav-Sap	
2 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	25,520	25,620	25,517	25,618	0,00315	0,00167	0,00943%	
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	24,879	26,012	24,876	26,009	0,00325	0,00299	0,01226%	
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,125	25,245	25,120	25,240	0,00545	0,00530	0,02134%	
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	25,525	25,571	25,517	25,566	0,00794	0,00491	0,02515%	
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	25,507	24,865	25,495	24,856	0,01204	0,00854	0,04086%	
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,464	25,496	25,448	25,486	0,01624	0,00987	0,05124%	
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,106	25,060	25,076	25,042	0,03050	0,01756	0,09580%	
4 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	26,540	25,680	26,529	25,665	0,01150	0,01485	0,05046%	
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,355	25,860	25,345	25,853	0,00956	0,00687	0,03208%	
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,850	25,820	25,841	25,815	0,00854	0,00456	0,02535%	
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	26,045	25,840	26,035	25,823	0,01050	0,01685	0,05271%	
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	25,458	25,157	25,433	25,138	0,02530	0,01885	0,08723%	
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,564	25,420	25,532	25,398	0,03250	0,02245	0,10778%	
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,450	25,012	25,415	24,983	0,03550	0,02864	0,12711%	
5 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	25,458	25,526	25,442	25,500	0,01560	0,02560	0,08081%	
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,125	25,231	25,099	25,212	0,02560	0,01862	0,08781%	
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,265	26,567	25,232	26,542	0,03350	0,02452	0,11194%	
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	25,584	26,458	25,552	26,436	0,03250	0,02248	0,10565%	
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	25,365	25,479	25,320	25,452	0,04550	0,02658	0,14177%	
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,650	25,458	25,591	25,402	0,05860	0,05650	0,22521%	
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,123	25,358	25,067	25,232	0,05640	0,12650	0,36231%	
6 N.m Avec	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	26,540	26,245	26,510	26,237	0,02969	0,00830	0,07197%	
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,798	26,680	25,788	26,650	0,01050	0,02954	0,07630%	
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,157	26,245	25,119	26,201	0,03850	0,04356	0,15964%	
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	25,354	26,564	25,295	26,521	0,05860	0,04256	0,19485%	
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	25,264	25,453	25,204	25,399	0,06012	0,05426	0,22553%	
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,425	25,653	25,365	25,602	0,06024	0,05120	0,21818%	
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,456	24,632	25,391	24,535	0,06521	0,09684	0,32353%	

PEV = polyéthylène vierge

PER = polyéthylène recyclé

Fibre = fibre de bouleau

La figure ci-dessous illustre l'évolution des pertes de masses présentée dans le tableau 4.11

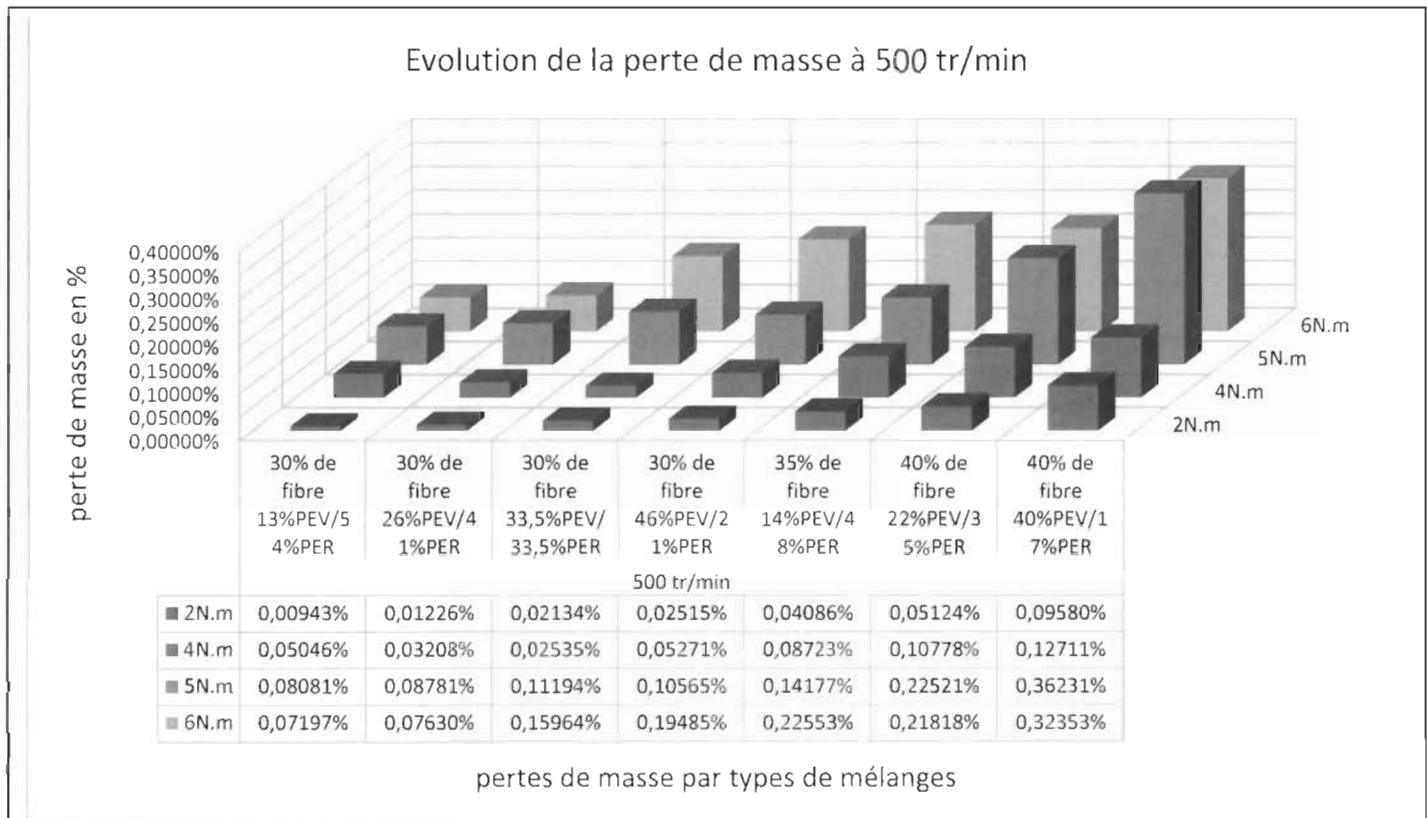


Figure 4.16 : Évolution des pertes de masse avant et après les essais thermomécaniques à 500 tr/min pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

D'après la figure 4.16, on remarque à première vue que la perte de masse croît avec la diminution du pourcentage de polyéthylène recyclé. Ceci peut être dû à la grande limite élastique du polyéthylène recyclé comparativement au polyéthylène vierge.

Toutefois on remarque aussi une hausse de valeurs des pertes de masse pour les composites à 40 % de fibres comparativement aux composites de même nature à 30% et 35% de fibres,

En outre, on constate aussi, que les pertes augmentent avec l'augmentation du couple appliqué. On note des valeurs très élevées pour des couples de 5 N.m et 6 N.m avec une valeur maximale de 0,362% pour l'éprouvette 40% de fibres ; 40% PEV, 7% PER, 3% MAPE.

4.2.2.2 – Analyse de la perte de masse à 1000 tr/min

Les résultats obtenus pour les essais à 1000 tr/min sont présentés dans le tableau 4.12 ci-dessous

Tableau 4.12 : Résultats des pertes de masses lors des essais de thermomécaniques à 1000 tr/min pour les composites HDPE vierge /HDPE recyclé/fibres de bouleau

Couple	Mené	Menant	masse avant [g]		masse après [g]		Perte de masse en [%]		
			m. mené	m. menant	m. mené	m. menant	?m mené	?m menant	?m Sav-Sap
2 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	26,540	26,245	26,475	26,197	0,06460	0,04830	0,21389%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	23,586	24,265	23,529	24,229	0,05680	0,03560	0,19310%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	23,856	25,685	23,801	25,663	0,05510	0,02240	0,15644%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	24,888	25,571	24,869	25,542	0,01860	0,02858	0,09350%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	25,845	25,456	25,738	25,376	0,10659	0,07970	0,36312%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,456	25,312	25,344	25,307	0,11230	0,00523	0,23150%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	24,584	25,286	24,428	25,274	0,15600	0,01230	0,33748%
4 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	24,351	24,447	24,270	24,386	0,08119	0,06070	0,29078%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,542	25,357	25,471	25,312	0,07139	0,04474	0,22815%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,158	25,264	25,089	25,236	0,06925	0,02815	0,19317%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	26,548	25,887	26,525	25,851	0,02338	0,03592	0,11309%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	26,231	23,154	26,097	23,054	0,13396	0,10016	0,47408%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,235	25,555	25,027	25,545	0,20843	0,00971	0,42949%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,325	25,813	25,035	25,790	0,28954	0,02283	0,61083%
5 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	24,438	24,447	24,317	24,357	0,12060	0,09017	0,43115%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,125	25,225	25,019	25,159	0,10604	0,06646	0,34260%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,235	25,126	25,132	25,084	0,10286	0,04182	0,28729%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	25,586	25,854	25,551	25,801	0,03472	0,05335	0,17122%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	26,556	26,257	26,154	25,957	0,40189	0,30048	1,32992%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	23,564	26,145	23,043	26,121	0,52107	0,02427	1,09706%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	24,587	23,456	23,863	23,399	0,72384	0,05707	1,62544%
6 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	25,364	22,423	25,147	22,261	0,21708	0,16230	0,79390%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,546	28,562	25,355	28,442	0,19087	0,11963	0,57384%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,318	23,268	25,133	23,193	0,18515	0,07527	0,53601%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	24,032	25,048	23,969	24,952	0,06250	0,09604	0,32302%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	25,036	26,085	24,313	25,544	0,72340	0,54087	2,47308%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,235	26,145	24,610	26,116	0,62529	0,02912	1,27366%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,560	24,025	24,691	23,957	0,86861	0,06849	1,88987%

Avec

PEV = polyéthylène vierge

PER = polyéthylène recyclé

Fibre = fibre de bouleau

La figure ci-dessous illustre l'évolution des pertes de masses présentée dans le tableau 4.12

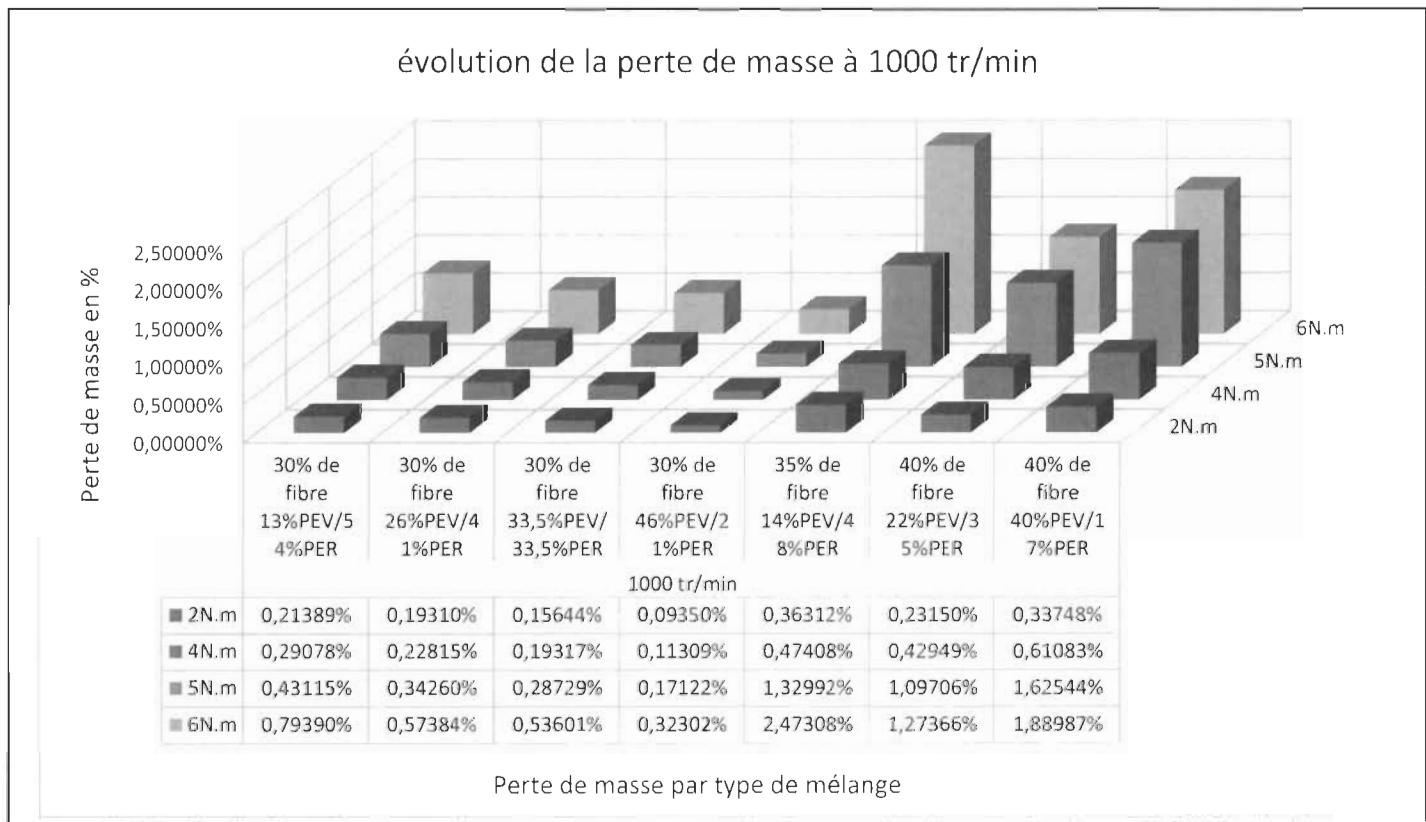


Figure 4.17 : Évolution des pertes de masses avant et après les essais thermomécanique à 1000 tr/min pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

À 1000 tr/min, le comportement semble différent. En effet pour les éprouvettes à 30% de fibres, la perte de masse diminue avec la diminution du pourcentage de polyéthylène recyclé dans le mélange.

À 40% de fibres, la perte de masse augmente avec l'augmentation du pourcentage de polyéthylène vierge dans le composite. Et à 35% on note des pics de valeurs assez élevés pour un couple de 6 N.m.

Dans tous les cas ; la perte de masse augmente avec l'augmentation du couple appliqué. De ceci on peut dire que la perte de masse augmente avec le pourcentage de fibres, le pourcentage de polyéthylène vierge et recyclé, et le couple appliqué.

4.2.2.3 – Analyse de la perte de masse à 1500 tr/min

Les résultats obtenus pour les essais à 1500 tr/min sont présentés dans le tableau 4.12 ci -dessous

Tableau 4.13 : Résultats des pertes de masses lors des essais de thermomécanique à 1000 tr/min pour les composites HDPE vierge /HDPE recyclé/fibres de bouleau

Couple	Mené	Menant	Vitesse de rotation = 1500 tr/min						
			masse avant [g]		masse après [g]		Perte de masse en [%]		
			m. mené	m. menant	m. mené	m. menant	?m mené	?m menant	?m Sav-Sap
2 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	26,540	26,245	26,420	26,156	0,11951	0,08936	0,39569%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,564	25,420	25,459	25,354	0,10508	0,06586	0,33528%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,458	25,157	25,356	25,116	0,10194	0,04144	0,28327%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	25,507	25,571	25,473	25,518	0,03441	0,05287	0,17088%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	24,888	25,571	24,778	25,489	0,10982	0,08211	0,38037%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,845	25,456	25,637	25,446	0,20776	0,00968	0,42383%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,456	25,312	25,167	25,289	0,28860	0,02276	0,61329%
4 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	24,351	24,447	24,189	24,326	0,16238	0,12141	0,58155%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,564	25,420	25,421	25,331	0,14277	0,08948	0,45555%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,458	25,157	25,320	25,101	0,13850	0,05630	0,38487%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	26,045	25,840	25,998	25,768	0,04675	0,07184	0,22857%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	26,540	25,680	25,951	25,239	0,58943	0,44071	1,97269%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,355	25,860	24,959	25,842	0,39601	0,01844	0,80925%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,778	25,813	25,228	25,770	0,55012	0,04337	1,15038%
5 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	24,438	24,447	24,197	24,267	0,24120	0,18034	0,86230%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,123	25,358	24,911	25,225	0,21207	0,13292	0,68341%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,650	25,458	25,444	25,374	0,20573	0,08363	0,56618%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	25,365	25,479	25,296	25,372	0,06945	0,10671	0,34646%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	25,584	26,458	25,327	26,266	0,25721	0,19231	0,86376%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,265	26,567	24,640	26,538	0,62529	0,02912	1,26255%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,335	25,530	24,466	25,462	0,86861	0,06849	1,84232%
6 N.m	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	24,331	24,632	23,973	24,364	0,35818	0,26780	1,27847%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	25,425	25,653	25,110	25,456	0,31493	0,19739	1,00301%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	25,264	25,453	24,958	25,329	0,30550	0,12420	0,84726%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	25,354	26,564	25,251	26,406	0,10313	0,15846	0,50386%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	25,157	26,245	24,361	25,596	0,79574	0,64904	2,81074%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	25,798	26,680	24,766	26,632	1,03172	0,04805	2,05757%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	25,197	25,117	23,764	25,004	1,43320	0,11300	3,07311%

Avec

PEV = polyéthylène vierge

PER = polyéthylène recyclé

Fibre = fibre de bouleau

La figure ci-dessous illustre l'évolution des pertes de masses présentée dans le tableau 4.13

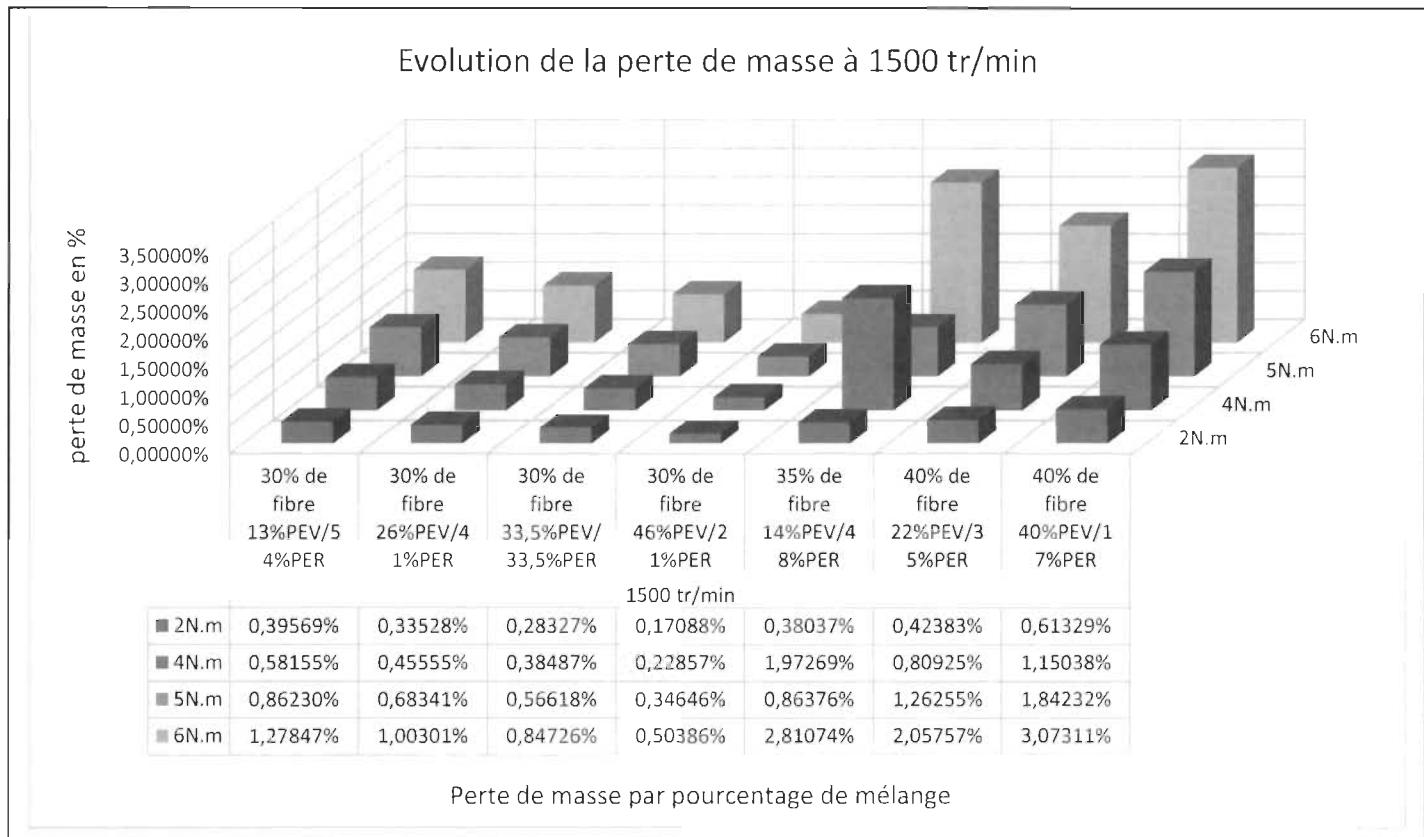


Figure 4.18 : Évolution des pertes de masses avant et après les essais thermomécanique à 1500 tr/min pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

À 1500 tr/min, on note une évolution de perte de masse similaire à l'évolution observée à 1000 tr/min, mais cette fois-ci avec quelques irrégularités. Entre 35% et 40%, on note de fortes pertes de masses pour les essais avec un couple de 4 Nm.

Toutefois l'allure générale laisse paraître que la perte de masse augmente par rapport aux pourcentages de polyéthylène recyclé, aux couples appliqués et aux pourcentages de fibres dans le composite.

4.2.2.4 – Récapitulatif des pertes de masse obtenues pour le HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau pour les vitesses de 500 tr/min, 1000 tr/min, et 1500 tr/min

D'une manière générale, la vue d'ensemble de l'évolution des pertes de masse est donnée par la figure 4.19

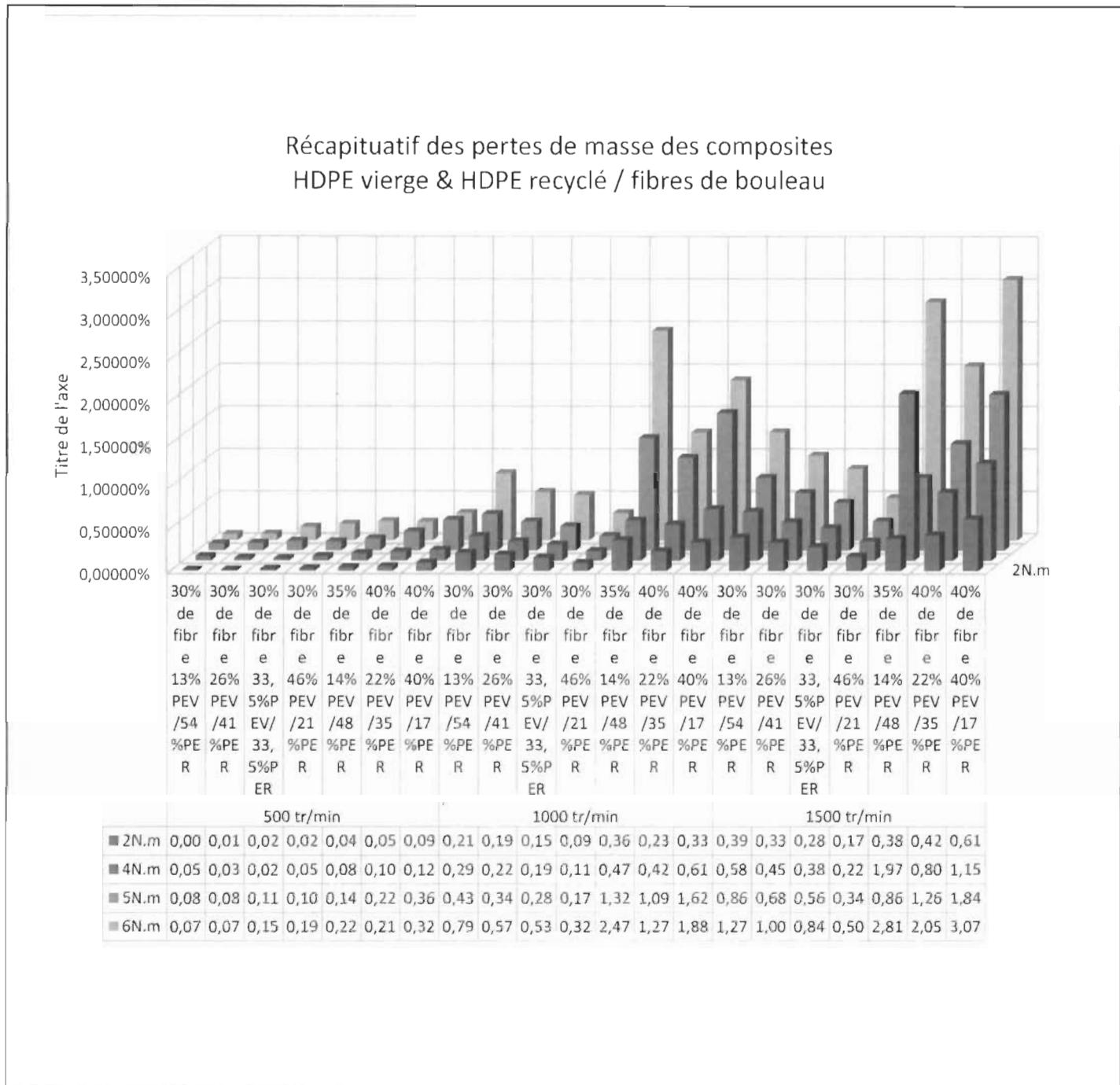


Figure 4.19 : Récapitulatif de l'évolution des pertes de masse pour toutes les valeurs de vitesses de rotation de l'essai des composites HDPE vierge/HDPE recyclé/fibre de bouleau

De la figure 4.19, on peut dire que dans son ensemble, s'agissant des composites polyéthylène vierge/recyclé/fibres de bouleau, la perte de masse augmente avec le couple appliqué, le pourcentage de fibres et grandement avec la vitesse de rotation. Puis on observe qu'elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de Polyéthylène recyclé

4.2.2.5 – Analyse des pertes de couple et du comportement thermique obtenu

4.2.2.5.1 – Analyse des pertes de couple

En ce qui concerne les engrenages HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau, le tableau 4.9 présente les résultats des pourcentages de couple obtenus lors des essais.

Tableau 4.14 : Pourcentage de couple maintenu à la fin de l'essai pour les composites HDPE vierge/fibres de bouleau

Pourcentage de maintien de couple à la fin des essais							
		30% de fibres 13%PEV/54%PER	30% de fibres 26%PEV/41%PER	30% de fibres 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibres 46%PEV/21%PER	35% de fibres 14%PEV/48%PER	40% de fibres 22%PEV/35%PER
500 tr/min	2N.m	72%	77%	79%	80%	83%	82%
	4N.m	76%	74%	79%	81%	82%	87%
	5N.m	78%	82%	84%	84%	85%	85,5%
	6N.m	90%	92%	94%	93%	94%	94%
1000 tr/min	2N.m	82%	86%	85%	87%	92%	92,5%
	4N.m	84%	85%	86%	88%	90,5%	95%
	5N.m	87%	88,5%	89%	90%	94%	96%
	6N.m	90%	92%	96%	94%	96%	97%
1500 tr/min	2N.m	92%	93%	93,5%	94%	95%	96%
	4N.m	91%	90%	93%	93,5%	95%	97%
	5N.m	92%	90,5%	93,5%	93%	95%	96%
	6N.m	90%	92%	95%	93%	96%	97%

A première vue on peut dire que les valeurs varient entre 80% et 97,5% respectivement à 30% et 40% de fibres et avec des vitesses de 500 tr/min et de 1500 tr/min.

La figure 4.20 illustre l'évolution des variations présentées dans le tableau 4.14

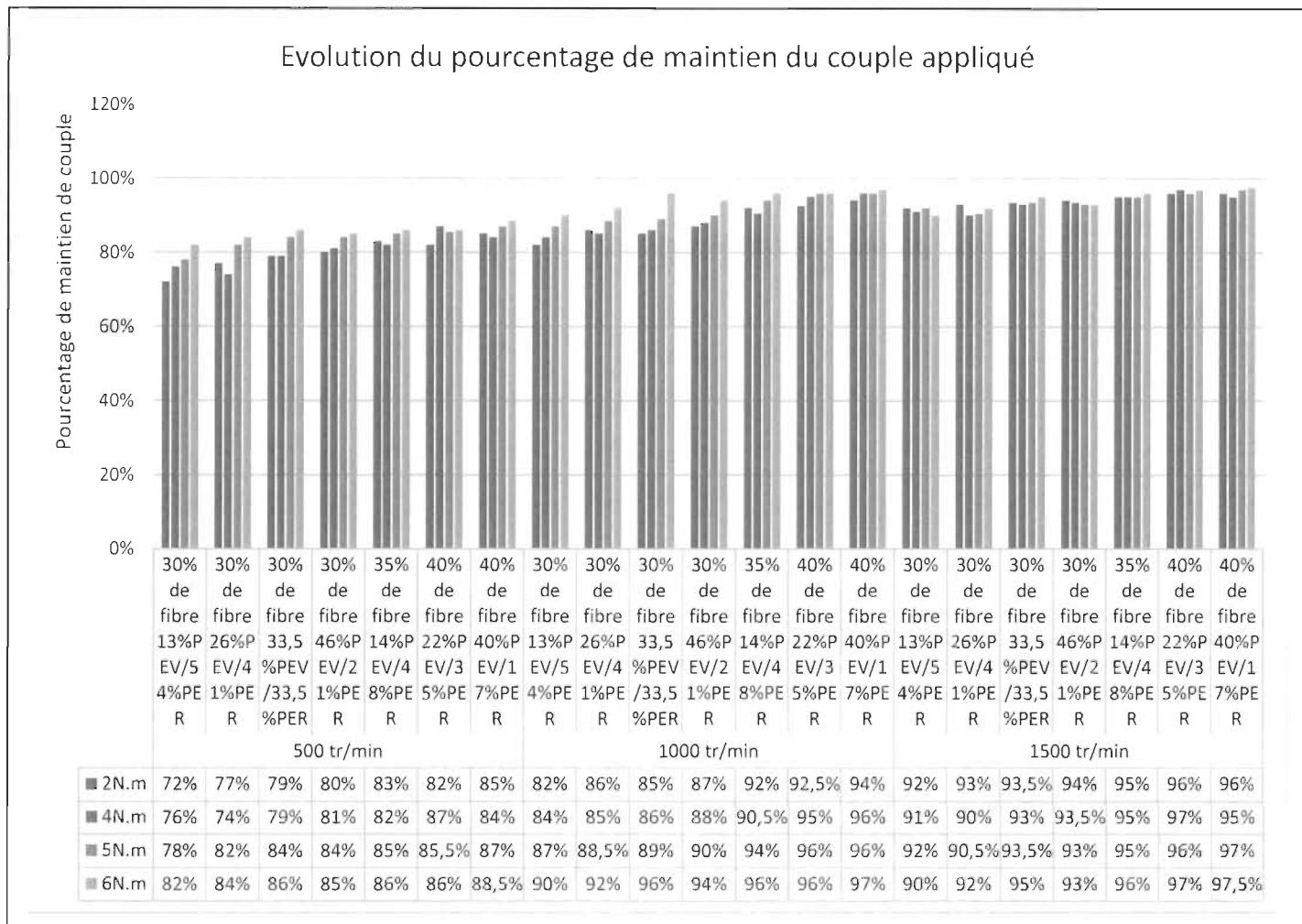


Figure 4.20 : Evolution du couple appliqué en fonction du pourcentage du m『lange et de la vitesse de rotation

D'après l'allure du graphique de la figure 4.20, on peut voir que les pourcentages sont les plus bas à 500 tr/min. Aussi, pour chacune des vitesses on note des valeurs élevées de pourcentages lorsque le couple appliqué durant l'essai est de 6 N.m.

Par ailleurs, on remarque que le pourcentage de couple maintenu augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres, l'augmentation du pourcentage de polyéthylène vierge et la diminution du polyéthylène recyclé dans le mélange.

4.2.2.5.2 – Analyse des températures

Pour les températures des engrenages HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau ; le tableau 4,15 ci-dessous présente les résultats obtenus lors des essais.

Tableau 4.15 : Températures des engrenages durant les essais pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

Température des engrenages avec du HDPE recyclé pendant les essais							
		30% de fibres 13%PEV/54%PER	30% de fibres 26%PEV/41%PER	30% de fibres 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibres 46%PEV/21%PER	35% de fibres 14%PEV/48%PER	40% de fibres 22%PEV/35%PER
500 tr/min	2N.m	40 °C	49 °C	55 °C	53 °C	60 °C	41 °C
	4N.m	43 °C	47 °C	53 °C	50 °C	66 °C	48 °C
	5N.m	46 °C	45 °C	56 °C	52 °C	61 °C	43 °C
	6N.m	50 °C	50 °C	59 °C	56 °C	58 °C	44 °C
1000 tr/min	2N.m	43 °C	46 °C	57 °C	46 °C	59 °C	44 °C
	4N.m	40 °C	47 °C	60 °C	53 °C	65 °C	51 °C
	5N.m	50 °C	43 °C	65 °C	58 °C	69 °C	55 °C
	6N.m	39 °C	39 °C	57 °C	60 °C	63 °C	56 °C
1500 tr/min	2N.m	37 °C	43 °C	53 °C	60 °C	58 °C	55 °C
	4N.m	40 °C	46 °C	55 °C	59 °C	59 °C	64 °C
	5N.m	39 °C	45 °C	59 °C	66 °C	64 °C	61 °C
	6N.m	35 °C	45 °C	55 °C	60 °C	62 °C	60 °C

À première vue, on peut dire que les températures maximales pour les essais HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau varient de 35 °C à 69 °C, respectivement à 30% et 35% de fibres de bouleau avec 500 tr/min, et 1000 tr/min.

La figure 4.21 ci-dessous illustre l'allure des variations de température présentée dans le tableau 4.15

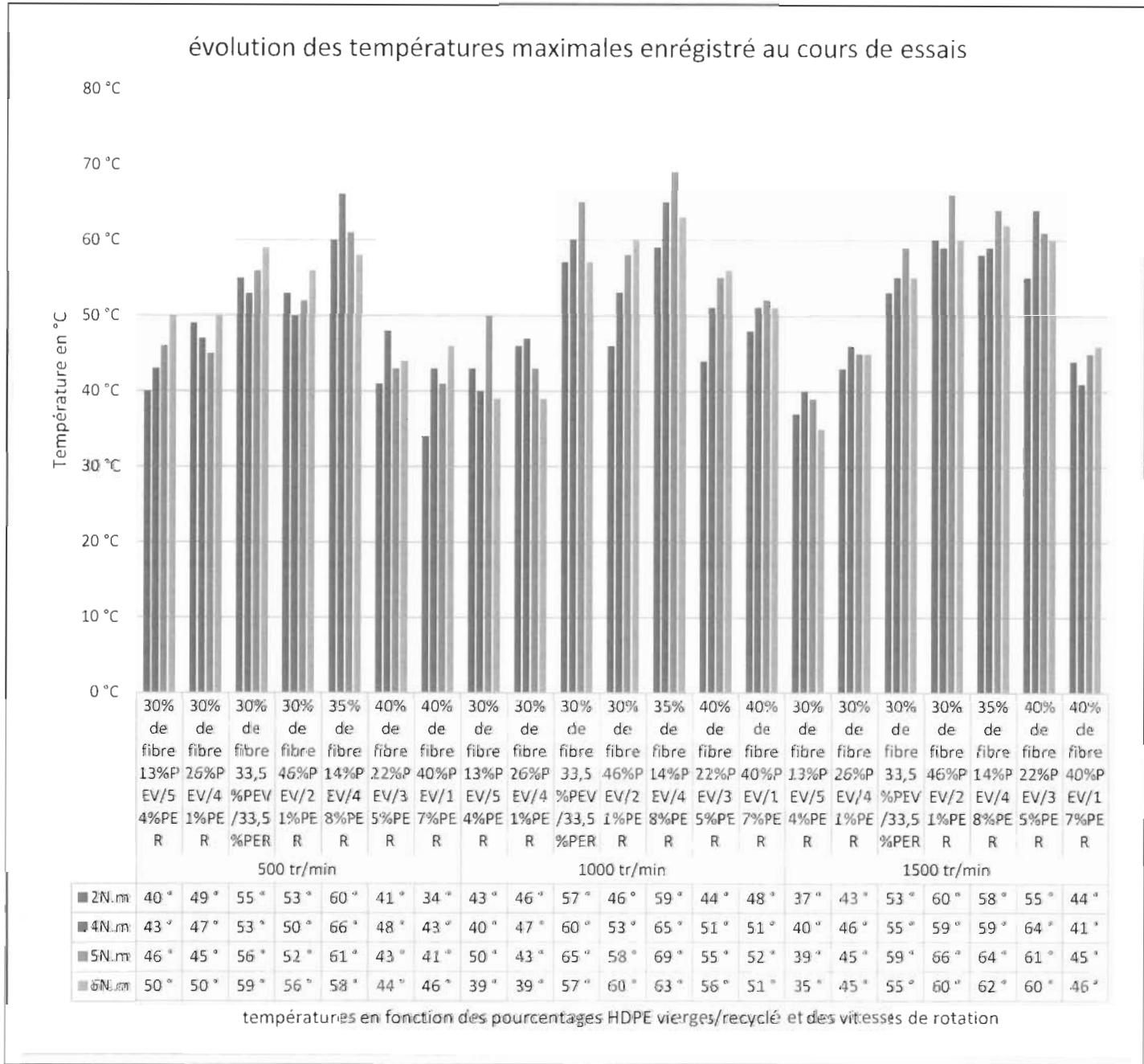


Figure 4.21 : Evolution de la température en fonction du pourcentage du mélange et de la vitesse de rotation

D'après la figure 4.20, on peut dire que l'allure de l'évolution des températures semble identique à chaque vitesse de rotation. En effet pour chacune des trois vitesses, on a à 30% de fibres, la température croît avec l'augmentation du pourcentage de polyéthylène vierge dans le mélange ; avec des pics de valeurs pour un couple de 6 Nm.

Ensuite, à 35% de fibres, on note une forte augmentation de la température, avec une valeur maximale observée pour un couple appliqué de 4 Nm. Cette augmentation de la température résulte probablement du pourcentage de polyéthylène recyclé très élevé dans le composite.

Pour finir à 40% de fibres, la température décroît avec l'augmentation du pourcentage de polyéthylène recyclé.

4.2.3 – Analyse comparative des résultats des essais de thermomécanique

Dans cette partie nous allons comparer les résultats des tests thermomécaniques pour les composites HDPE vierge/fibres de bouleau et les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau. Pour ce faire, étant donné d'après de multiples études faites sur les composites HDPE/fibres de bouleau, que seuls les composites de 30% et 40% de fibres présentaient des résultats intéressants ; nous allons retenir pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau, deux échantillons respectivement à 35% et 40% de fibres pour effectuer la comparaison.

4.2.3.1 – Analyse comparative des pertes de masses HDPE vierges/fibre de bouleau – HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau

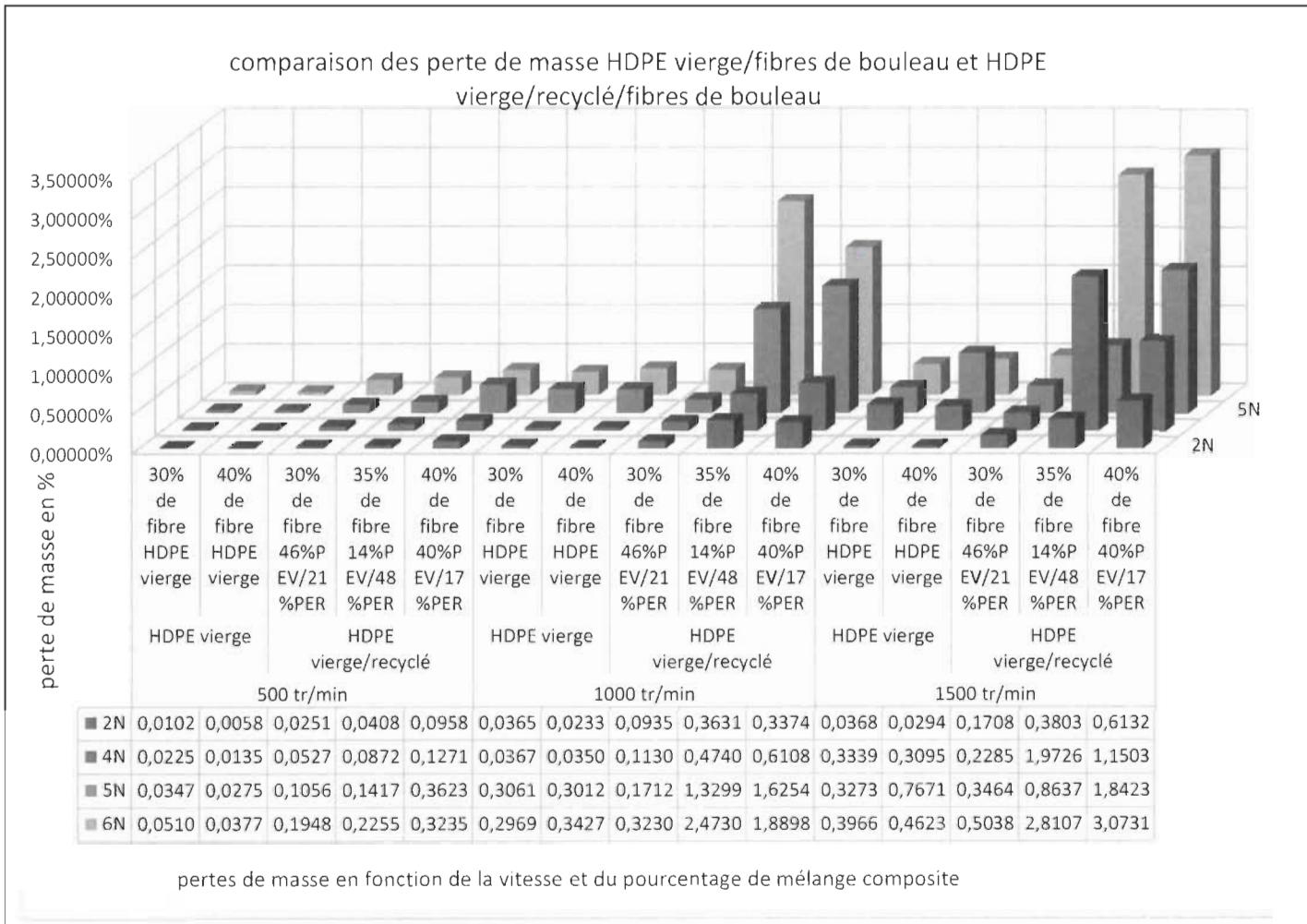


Figure 4.22 : Bilan comparatif des pertes de masse HDPE vierge/fibre de bouleau et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

D'un point de vue général, on constate que les composites en HDPE vierge présentent le moins de perte de masse comparativement aux composites HDPE vierges/recyclés pour chacune des vitesses de 500 tr/min, 1000 tr/min, 1500 tr/min.

Cependant on remarque que les pertes de masse des composites HDPE vierge/recyclé à 500 tr/min sont quasi identiques aux pertes de masses des composites HDPE vierge à 1000 tr/min lorsque les couples appliqués sont de 5 Nm et 6 Nm

Par ailleurs pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau, les valeurs maximales des pertes sont atteintes avec un couple appliqué de 6 N.m, pour les composites de 35% et de 40% de fibres.

4.2.3.2 – Analyse comparative des pourcentages de maintien de couple HDPE vierge/fibre de bouleau – HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau

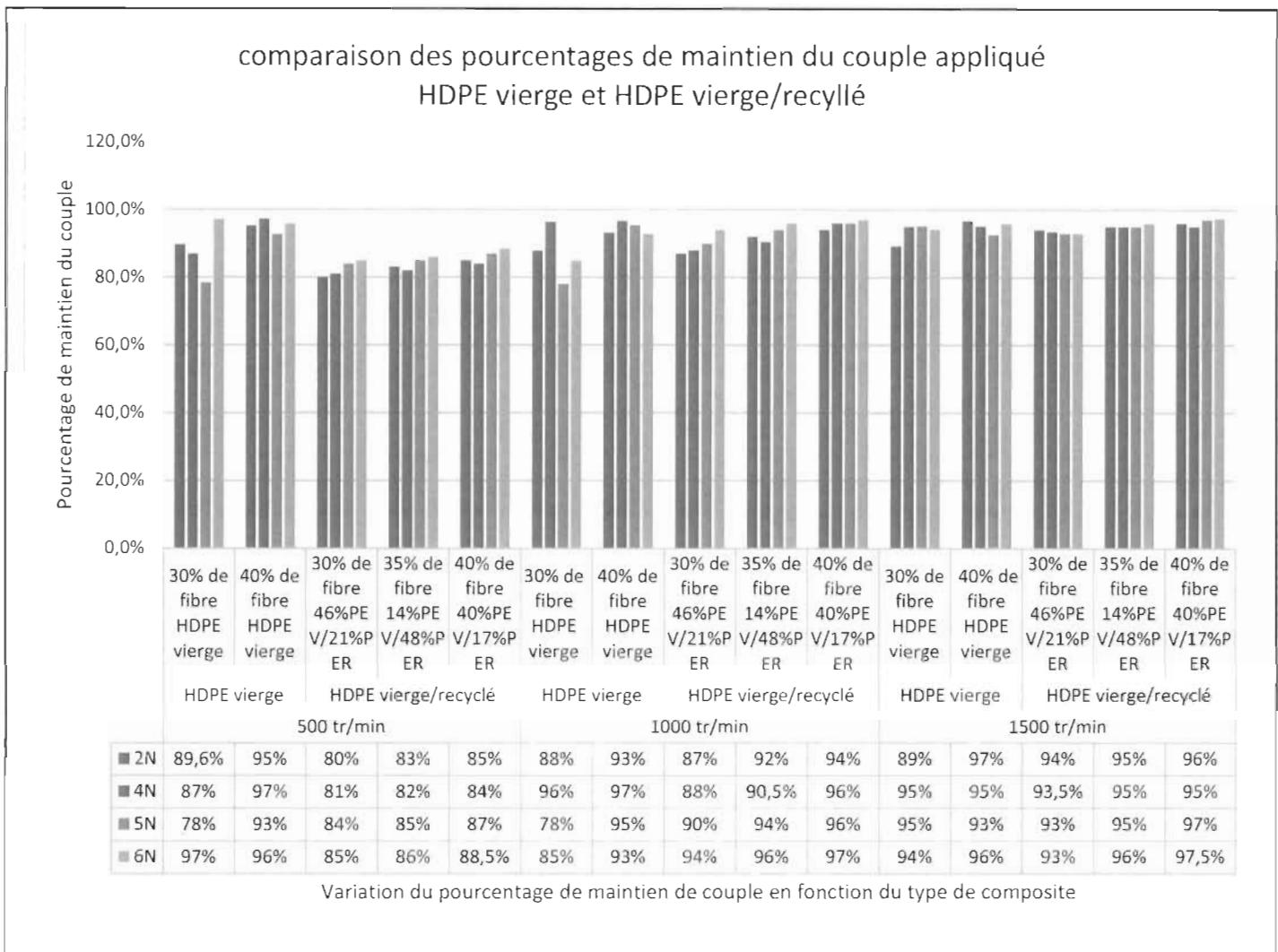


Figure 4.23 : Bilan comparatif des pourcentages de maintien de couple appliqué (composites HDPE vierge/fibres de bouleau et composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

Concernant le pourcentage de maintien du couple appliqué, on peut dire d'après l'observation effectuée de la figure 4.23 que les pourcentages varient autour de la même valeur pour les composites 30%, 35% et 40% de fibres avec des couples de 5 N.m et 6 Nm

Ce pendant à 500 tr/min, le pourcentage de maintien du couple semble proportionnel aux couples appliqués. Toutefois, le HDPE vierge a des pourcentages de maintien de couple plus élevé que ceux du HDPE vierge/recyclé.

4.2.3.3 – Analyse comparative des températures HDPE vierge/fibre de bouleau – HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau

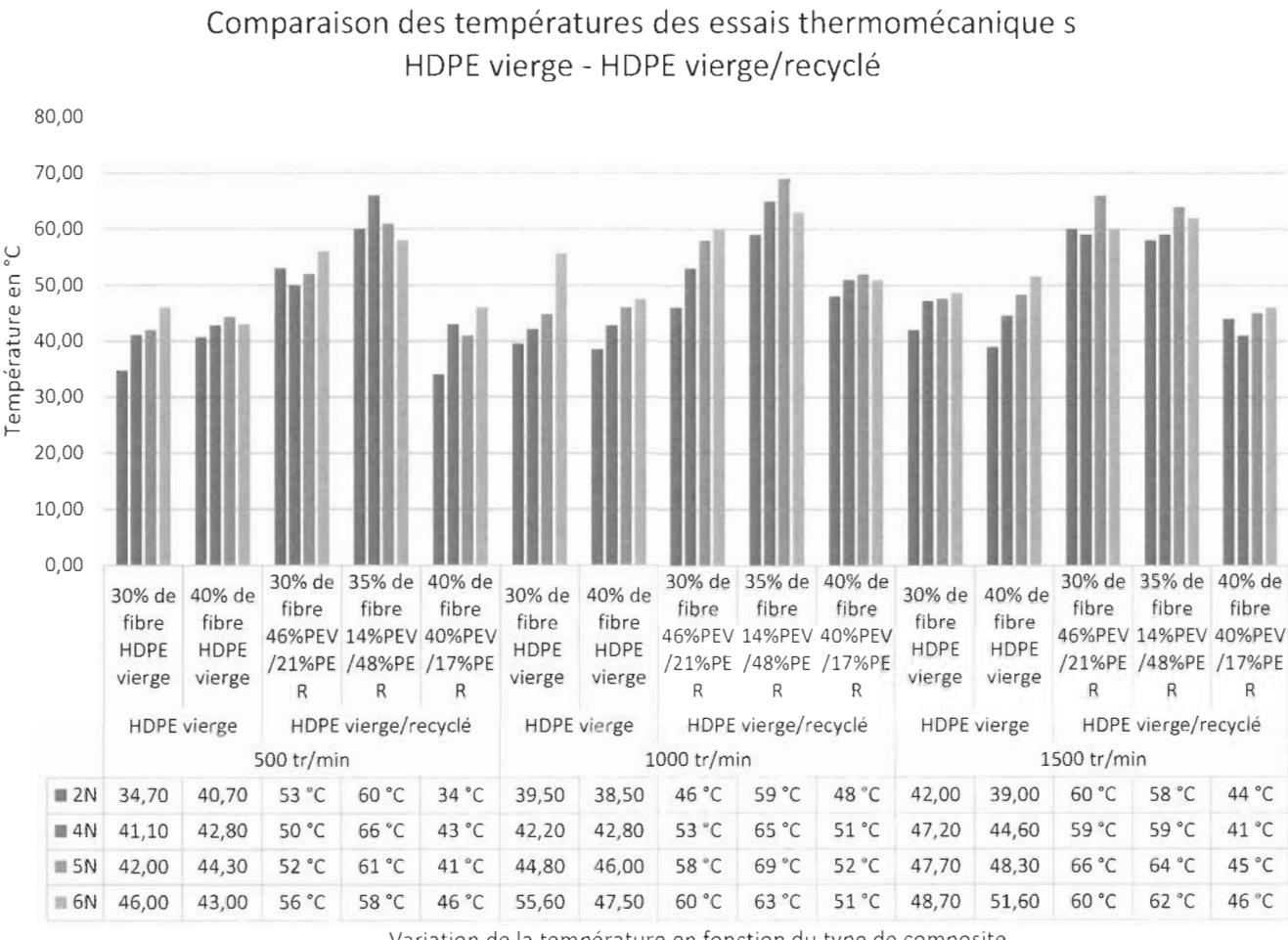


Figure 4.24 : bilan comparatif des températures des essais thermomécaniques HDPE vierges/fibres de bouleau et HDPE vierges/recyclés/fibres de bouleau

À première vue, on remarque qu'à chacune des trois vitesses de rotation 500 tr/min, 1000 tr/min, 1500 tr/min, les températures les plus élevées sont obtenues pour le composite HDPE vierge/recyclé/fibre de bouleau avec 35% de fibre, 14% de polyéthylène vierge et 48% de polyéthylène recyclé. De ceci, on peut conclure qu'une hausse de HDPE recyclé par rapport au HDPE vierge dans le composite, conduit à des températures élevées lors de l'essai. Cette caractéristique peut être due aux HDPE recyclés qui du fait de sa nature s'échauffent rapidement lors des frottements, et ne dissipe pas la chaleur.

Par ailleurs, pour chacun des deux types de composites HDPE vierge et HDPE vierge/recyclé, la température croît avec le pourcentage de HDPE recyclé et le couple appliqué.

4.3 – Analyses et interprétations des résultats de tribologie

Les analyses de tribologie concernent surtout l'évolution de la perte de masse, l'évolution du coefficient de frottement des éprouvettes suivant des taux de glissement fixes de 1.79%; 5.13%; 10,53%; de 22,22% ; une valeur de charge appliquée 336 N et une vitesse de 850 tr/min, pour des masses initiales d'éprouvettes variant entre 16,2 g et 18.05 g.

Pour ce faire, nous considérerons, pour la réalisation ces essais, d'étudier uniquement les meilleurs pourcentages de mélange par types de composites comme pour les essais de thermomécanique.

Cela étant, nous allons pour les composites HDPE vierge/fibres de bouleau considérer les mélanges de 30% et 40% de fibres pour les essais de ce type de composite. Pour les composites HDPE vierge/recyclés/fibre de bouleau, nous allons aussi considérer 30% et 40% de fibres avec trois variétés de pourcentage HDPE vierge/recyclé/fibre de bouleau à 30% et deux variétés de pourcentage de mélange à 40%

Dans les lignes qui suivent nous présenterons d'abord les résultats des essais pour les composites HDPE vierge/fibres de bouleau, puis nous présenterons les résultats pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau et enfin nous présenterons une petite analyse comparative pour ces deux types de composites.

4.3.1 – Cas des éprouvettes en rondelles de composites HDPE vierge/fibres de bouleau

4.3.1.1 – Analyse de l'évolution de la perte de masse sur des rondelles HDPE vierge/fibres de bouleau pour un taux de glissement de 22,22%

Les résultats des essais effectués sur les disques normalisés menants et menés avec une force de 336 N appliquée sur les paires de disques identiques sont présentés dans le tableau 4.16 suivant :

Tableau 4.16 : Résultats perte de masse pour les essais de tribologie

Rondelle HDPE vierge									
			Vitesse de rotation = 850 tr/min						
			masse avant [g]		masse après [g]		Perte de masse en [%]		
S (%)	Mené	Menant	m. mené	m. menant	m. mené	m. menant	Δm mené	Δm menant	Δm Sav-Sap
1,79	HDPE 30%	HDPE 30%	16,832	16,21	16,817	16,207	0,08912	0,01851	0,05448
	HDPE 40%	HDPE 40%	17,501	17,115	16,54	17,025	5,49111	0,52585	3,03617
5,13	HDPE 30%	HDPE 30%	16,736	16,239	16,516	16,205	1,31453	0,20937	0,77028
	HDPE 40%	HDPE 40%	18,169	18,26	17,95	18,228	1,20535	0,17525	0,68901
10,53	HDPE 30%	HDPE 30%	16,349	16,584	16,285	16,54	0,39146	0,26532	0,32794
	HDPE 40%	HDPE 40%	17,732	17,832	17,701	17,776	0,17483	0,31404	0,24463
22,22	HDPE 30%	HDPE 30%	16,864	16,994	16,73	16,918	0,79459	0,44722	0,62024
	HDPE 40%	HDPE 40%	17,603	18,05	16,855	17,764	4,24928	1,58449	2,90018

Avec

S : taux de glissement

La figure 4.25 ci-dessous présente l'évolution de l'usure des disques des composites HDPE/fibres de bouleau obtenue lors des essais de tribologie normalisés.

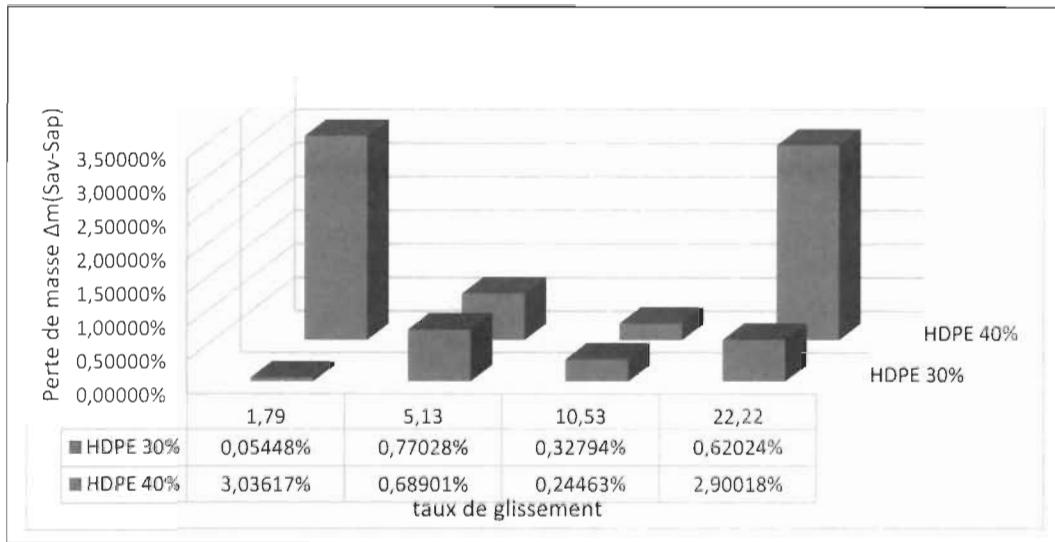


Figure 4.25 : Variation de la perte masse en fonction du taux de glissement pour les composites HDPE vierge/fibre de bouleau

À 336 N de charge, les pertes de masse les moins élevées sont obtenues avec les paires de disques HDPE avec 40% de fibres de bouleau, et pour un taux de glissement de 10,53%.

Toutefois entre 5,13% et 10,53% de taux de glissement ; l'usure augmente avec la diminution du taux de fibres. En effet pour chacune de ces deux valeurs de taux de glissement, l'usure obtenue avec le composite HDPE/40% de fibres de bouleau est inférieure à l'usure obtenue avec le composite HDPE/30% de fibres de bouleau.

Par ailleurs on remarque aussi que l'usure augmente avec la diminution du taux de glissement imposé pendant l'essai. Les valeurs d'usures obtenues à 10,53% de taux de glissement sont inférieures aux valeurs d'usures obtenues à 5,13% de taux d'usure imposé.

4.3.1.2 – Analyse de l'évolution du coefficient de frottement sur des rondelles composites HDPE vierge/fibres de bouleau pour un taux de glissement de 22,22%

Le tableau 4.17 présente les coefficients de frottement obtenus pour les disques normalisés menant et mené identiques durant des essais effectués avec une charge normale de 336 N appliquée sur les paires des disques identiques des cinq composites étudiés.

Tableau 4.17 : Coefficient de frottement obtenu après les essais de tribologie pour les composites HDPE vierges/fibres de bouleau

Coefficient de frottement essai sur rondelle HDPE vierge/fibres de bouleau			
S (%)	Mené	Menant	Coefficient de frottement
1,79	HDPE 30%	HDPE 30%	0,19
	HDPE 40%	HDPE 40%	0,17
5,13	HDPE 30%	HDPE 30%	0,13
	HDPE 40%	HDPE 40%	0,14
10,53	HDPE 30%	HDPE 30%	0,13
	HDPE 40%	HDPE 40%	0,13
22,22	HDPE 30%	HDPE 30%	0,18
	HDPE 40%	HDPE 40%	0,11

La figure 4.26 présente l'évolution du coefficient de frottement des disques des composites HDPE/fibres de bouleau obtenu lors des essais de tribologie normalisés

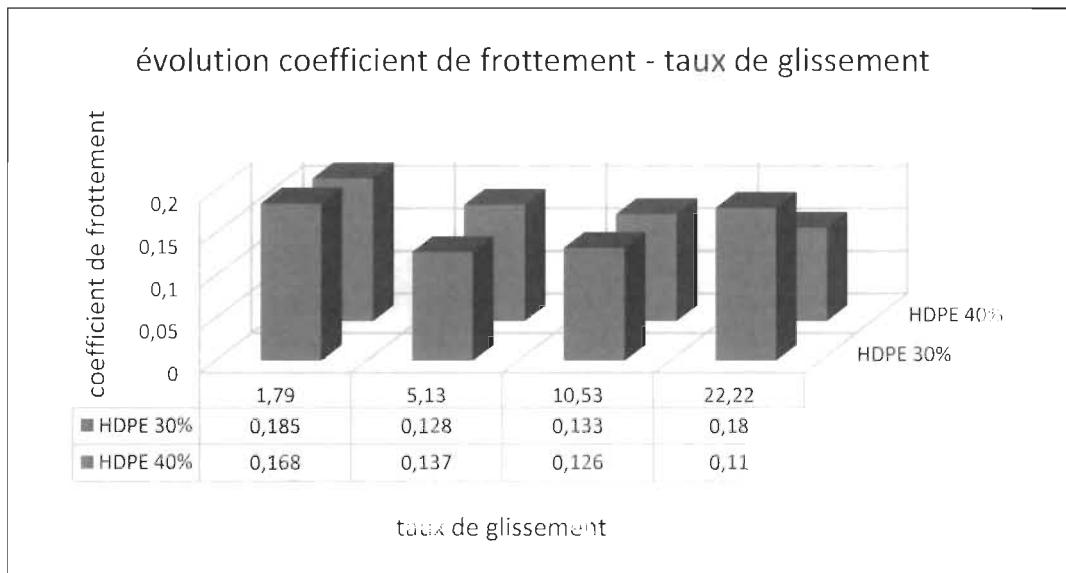


Figure 4.26 : Evolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement pour les composites HDPE vierge/fibre de bouleau

D'après la figure 4.26, on peut dire que le coefficient de frottement est relativement faible, allant de 0,11 pour un taux de glissement de 22,22% ; à 0,185 pour un taux de glissement de 1,79. Toutefois, on remarque qu'à HDPE/40% de fibres le coefficient de frottement augmente avec la diminution du taux de glissement imposé durant l'essai. Cependant à 30 % on note un comportement plus ou moins étrange. En effet, à 1,79% et à 22,22% de taux de glissement, on a des valeurs plus élevées du coefficient de frottement ; et à 5,13% et 10,53% de taux de

glissement, on a des valeurs basses et stables. Ceci ne permet pas de prédire le comportement du coefficient de frottement.

4.3.2 – Cas des éprouvettes rondelles en composites HDPE vierges/recyclés/fibre de bouleau

4.3.2.1 – Analyse de l'évolution de la perte de masse sur des rondelles de composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau pour un taux de glissement de 22,22%

Les résultats des essais effectués sur les disques normalisés menants et menés avec une force de 336 N appliquée sur les paires de disques identiques sont présentés dans le tableau 4.18 suivant :

Tableau 4.18 : Résultats des pertes de masse obtenues pour les essais de tribologie pour les composites HDPE vierges/recyclés/fibres de bouleau

Perte de masse sur essais tribologique sur rondelles HDPE vierge/recyclé / fibre de bouleau									
			Vitesse de rotation = 850 tr/min						
			masse avant [g]		masse après [g]		Perte de masse en [%]		
S (%)	Mené	Menant	m. mené	m. menant	m. mené	m. menant	?m mené	?m menant	?m Sav-Sap
1,79	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	14,836	14,260	14,324	14,193	0,51223	0,06734	1,99192%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	15,194	14,696	14,888	14,654	0,30555	0,04214	1,16322%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	15,237	14,065	15,035	14,018	0,20204	0,04654	0,84834%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	15,255	14,771	15,067	14,731	0,18794	0,03991	0,75884%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	14,855	14,445	14,570	14,421	0,28542	0,02365	1,05485%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	14,609	15,212	14,393	15,170	0,21622	0,04235	0,86707%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	15,250	14,820	15,084	14,788	0,16582	0,03167	0,65677%
5,13	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	15,180	14,212	14,857	14,163	0,32254	0,04864	1,26286%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	15,294	14,620	15,071	14,615	0,22254	0,00525	0,76147%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	15,188	14,357	15,087	14,305	0,10142	0,05209	0,51956%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	15,775	15,040	15,694	14,993	0,08052	0,04685	0,41335%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	16,270	14,880	16,118	14,820	0,15214	0,06023	0,68177%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	15,085	15,060	14,976	14,991	0,10854	0,06871	0,58799%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	15,580	15,020	15,496	14,977	0,08439	0,04256	0,41487%
10,53	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	14,853	14,558	14,797	14,432	0,05640	0,12650	0,62188%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	15,380	14,658	15,321	14,602	0,05860	0,05650	0,38318%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	15,095	14,679	15,050	14,652	0,04550	0,02658	0,24209%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	15,314	15,658	15,282	15,636	0,03250	0,02248	0,17752%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	14,995	15,767	14,942	15,717	0,05335	0,04983	0,33541%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	14,855	14,431	14,810	14,392	0,04526	0,03862	0,28642%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	15,188	14,726	15,172	14,700	0,01560	0,02560	0,13773%
22,22	30% de fibre 13%PEV/54%PER	30% de fibre 13%PEV/54%PER	15,186	13,832	15,121	13,735	0,06521	0,09684	0,55845%
	30% de fibre 26%PEV/41%PER	30% de fibre 26%PEV/41%PER	15,155	14,853	15,095	14,802	0,06024	0,05120	0,37137%
	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibre 33,5%PEV/33,5%PER	14,994	14,653	14,951	14,648	0,04256	0,00452	0,15880%
	30% de fibre 46%PEV/21%PER	30% de fibre 46%PEV/21%PER	15,084	15,764	15,045	15,763	0,03861	0,00115	0,12889%
	35% de fibre 14%PEV/48%PER	35% de fibre 14%PEV/48%PER	14,887	15,445	14,849	15,401	0,03850	0,04356	0,27054%
	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	15,528	15,880	15,502	15,850	0,02552	0,02954	0,17531%
	40% de fibre 40%PEV/17%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	16,270	15,445	16,249	15,437	0,02069	0,00830	0,09141%

Avec

PEV = polyéthylène vierge

PER = polyéthylène recyclé

Fibre = fibre de bouleau

S (%) = taux de glissement imposé en pourcentage

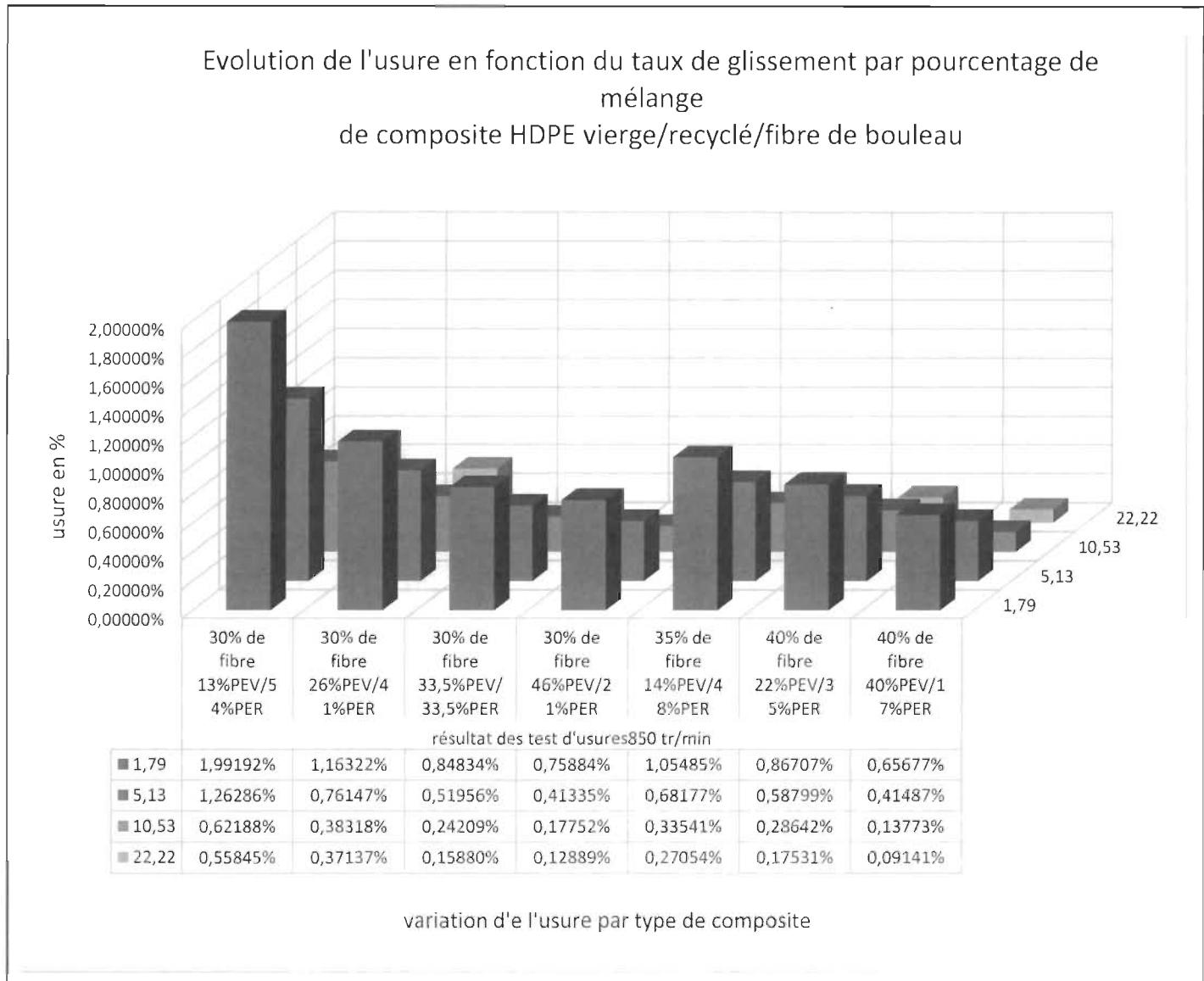


Figure 4.27 Récapitulatif de l'évolution des pertes de masse pour tous les taux de glissement de l'essai de tribologie des composites HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau

D'après le graphique illustré à la figure 4.27, on identifie deux zones avec une évolution quasi identique

En dans la première zone qui correspond aux composites de 30% de fibres de bouleau, on remarque que l'usure croît avec le pourcentage de polyéthylène recyclé dans le composite.

En effet à 54% de polyéthylène recyclé, l'usure atteint un pourcentage maximal de 1,99%, et à 21% de polyéthylène recyclé, l'usure a un pourcentage max de 0.758%.

Dans la deuxième zone, qui est la zone 35% à 40% de fibre de bouleau, on remarque la même évolution ; c'est-à-dire que là aussi, l'usure croît avec le pourcentage de polyéthylène recyclé dans le composite. En effet à 35% de fibres et 48% de HDPE recyclé, l'usure est de 1,054% tandis qu'avec un pourcentage de fibres de 40% qui est plus élevé que 35%, et 17% de HDPE recyclés, l'usure est de 0,656%

Par ailleurs on remarque que pour ces deux zones, l'usure augmente aussi avec le pourcentage de fibres et diminue avec le taux de glissement imposé durant l'essai.

4.3.2.2 – Analyse de l'évolution du coefficient de frottement de masse sur des rondelles HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau pour un taux de glissement de 22,22%

Le tableau 4.28 restitue les résultats des coefficients de frottement obtenu lors des essais de tribologie sur des rondelles normalisées avec une charge de 336 N.

Tableau 4.19 : Résultats des coefficients de frottement obtenus pour les essais de tribologie sur les rondelles composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

Coefficient de frottement essai sur rondelle HDPE vierge/recyclé/fibre de bouleau à 850 tr/min							
S (%)	30% de fibres 13%PEV/54%PER	30% de fibres 26%PEV/41%PER	30% de fibres 33,5%PEV/33,5%PER	30% de fibres 46%PEV/21%PER	35% de fibres 14%PEV/48%PER	40% de fibres 22%PEV/35%PER	40% de fibres 40%PEV/17%PER
1,79	0,116	0,126	0,146	0,166	0,136	0,086	0,106
5,13	0,141	0,151	0,171	0,191	0,161	0,111	0,131
10,53	0,151	0,161	0,181	0,201	0,171	0,121	0,141
22,22	0,170	0,180	0,200	0,220	0,190	0,140	0,160

D'après le tableau 4.19, les coefficients de frottements appliqués sur les rondelles qui ont fait l'objet de l'étude varient entre 0,086 et 0,22. Ceci étant, la figure 4.28 ci-dessous illustre l'allure de l'évolution de ces frottements.

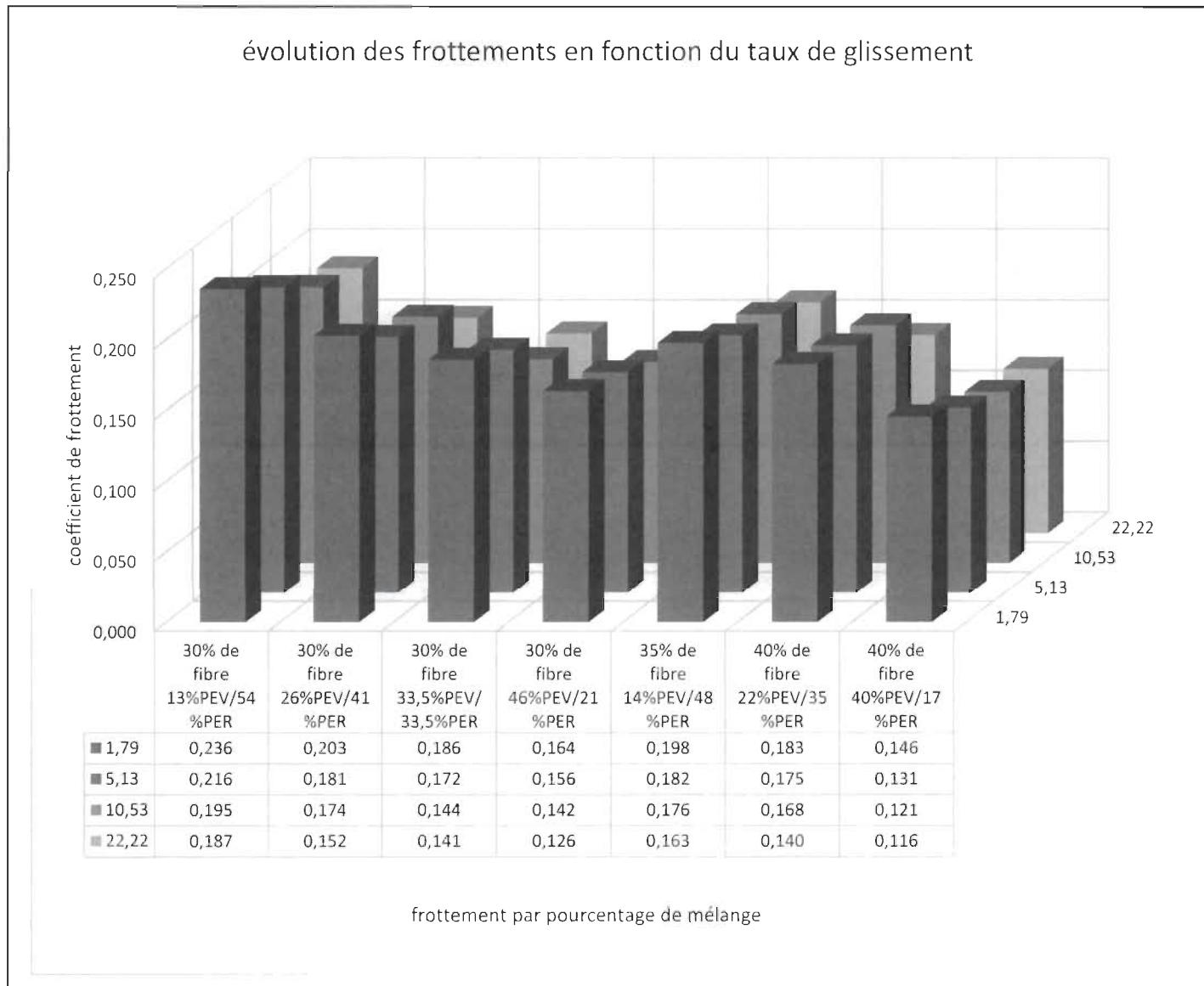


Figure 4.28 : Récapitulatif de l'évolution des pertes de masse pour tous les taux de glissement de l'essai de tribologie des composites HDPE vierge/HDPE recyclé/fibres de bouleau

D'une manière générale, à 30% de fibres dans le composite, les frottements augmentent avec l'augmentation du pourcentage de polyéthylène recyclé dans le mélange. Et de 35 à 40% de fibres de bouleau dans le mélange, on observe une évolution similaire. En effet, pour ces derniers, les coefficients de frottements varient aussi dans le même sens que celui du pourcentage de polyéthylène recyclé dans le composite.

Par ailleurs, on remarque aussi que les frottements sont inversement proportionnels aux taux de glissement imposé.

4.3.3 – Analyse comparative des résultats des essais de tribologie

Dans cette section nous allons faire une analyse comparative entre le comportement des composites HDPE vierge /fibres de bouleau et les composites HDPE vierges/recyclé/fibres de bouleau pour nous permettre d'en déduire une prédition sur le plan de l'usure et du frottement.

Pour ce faire nous allons retenir et comparer les pourcentages de mélanges qui ont produit individuellement les meilleurs résultats dans chacun des essais de tribologie effectués pour chaque type de composite HDPE vierge/fibres de bouleau et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau.

4.3.3.1 – Analyse comparative des résultats d'usure en tribologie : HDPE vierge/fibre de bouleau, et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

Le tableau 4.20 présente les meilleurs pourcentages de mélanges et leurs résultats des essais d'usures.

Tableau 4.20 : Récapitulatif des meilleurs résultats des essais d'usure HDPE vierge/fibres et HDPE vierge/recyclé/fibres

S (%)	Usure					
	HDPE vierge		HDPE vierge/recyclé			
30% de fibres HDPE vierge	30% de fibres HDPE vierge	40% de fibres HDPE vierge	30% de fibres 46%PEV/21%PER	40% de fibres 22%PEV/35%PER	40% de fibres 40%PEV/17%PER	
1,79	0,05448%	3,03617%	0,75884%	0,86707%	0,65677%	
5,13	0,77028%	0,68901%	0,41335%	0,58799%	0,41487%	
10,53	0,32794%	0,24463%	0,17752%	0,28642%	0,13773%	
22,22	0,62024%	2,90018%	0,12889%	0,17531%	0,09141%	

La figure 4.29 ci-dessous illustre l'évolution comparative des deux types de composites

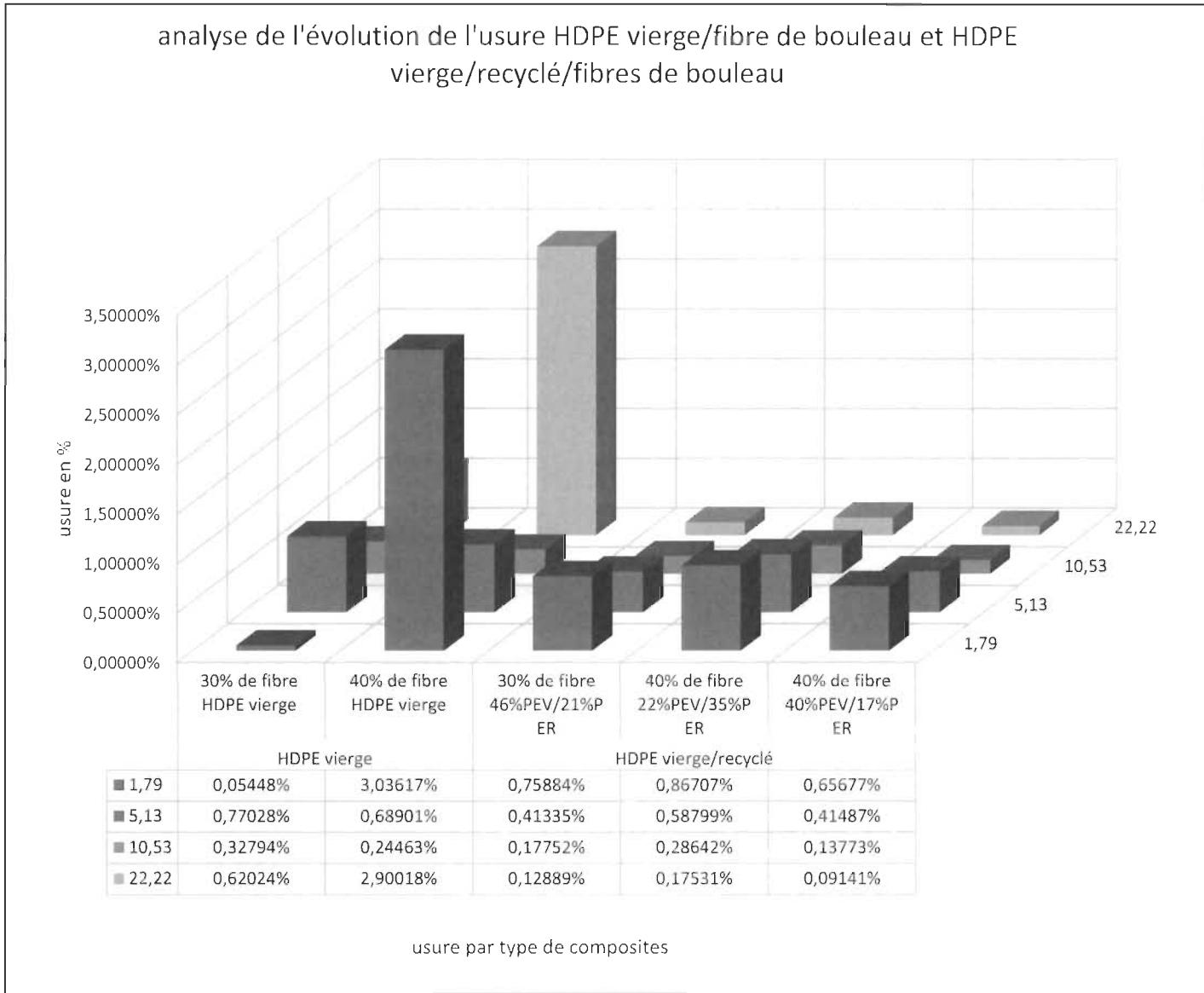


Figure 4.29 : Évolution comparative des comportements d'usure des composites HDPE vierge/fibres et HDPE vierge/recyclé/fibre

À première vue, on remarque que pour tous les taux de glissement imposés durant les essais; les cas HDPE vierges/fibres de bouleau présentent les valeurs d'usure les plus élevées. En effet l'ajout du HDPE vierge dans des proportions de 17% à 35% réduit considérablement l'usure du composite. Autrement dit les pièces en composite HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau s'useront moins vite que les pièces faites à base de HDPE vierge/fibres de bouleau uniquement.

Par ailleurs, dans les deux cas HDPE vierge/fibres de bouleau et les HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau, l'usure observée augmente avec la diminution du taux de glissement imposé durant les essais

4.3.3.2 – Analyse comparative des résultats de coefficient de frottement en tribologie : HDPE vierge/fibres de bouleau, et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

Le tableau 4.21 présente les meilleurs pourcentages de mélanges et leurs coefficients de frottement respectif, obtenus durant les essais de tribologie.

Tableau 4.21 : Récapitulatif des meilleurs résultats des essais d'usure : cas HDPE vierge/fibres et HDPE vierge/recyclé/fibres

S (%)	Coefficient de frottement					
	HDPE vierge		HDPE vierge/recyclé			
	30% de fibre HDPE vierge	40% de fibre HDPE vierge	30% de fibre 46%PEV/21%PER	40% de fibre 22%PEV/35%PER	40% de fibre 40%PEV/17%PER	
1,79	0,185	0,168	0,164	0,183	0,146	
5,13	0,128	0,137	0,156	0,175	0,131	
10,53	0,133	0,126	0,142	0,168	0,121	
22,22	0,18	0,11	0,126	0,140	0,116	

La figure 4.30 ci-dessous illustre l'évolution comparative des deux types de composites

analyse évolution de l'usure HDPE vierge/fibre de bouleau et
HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

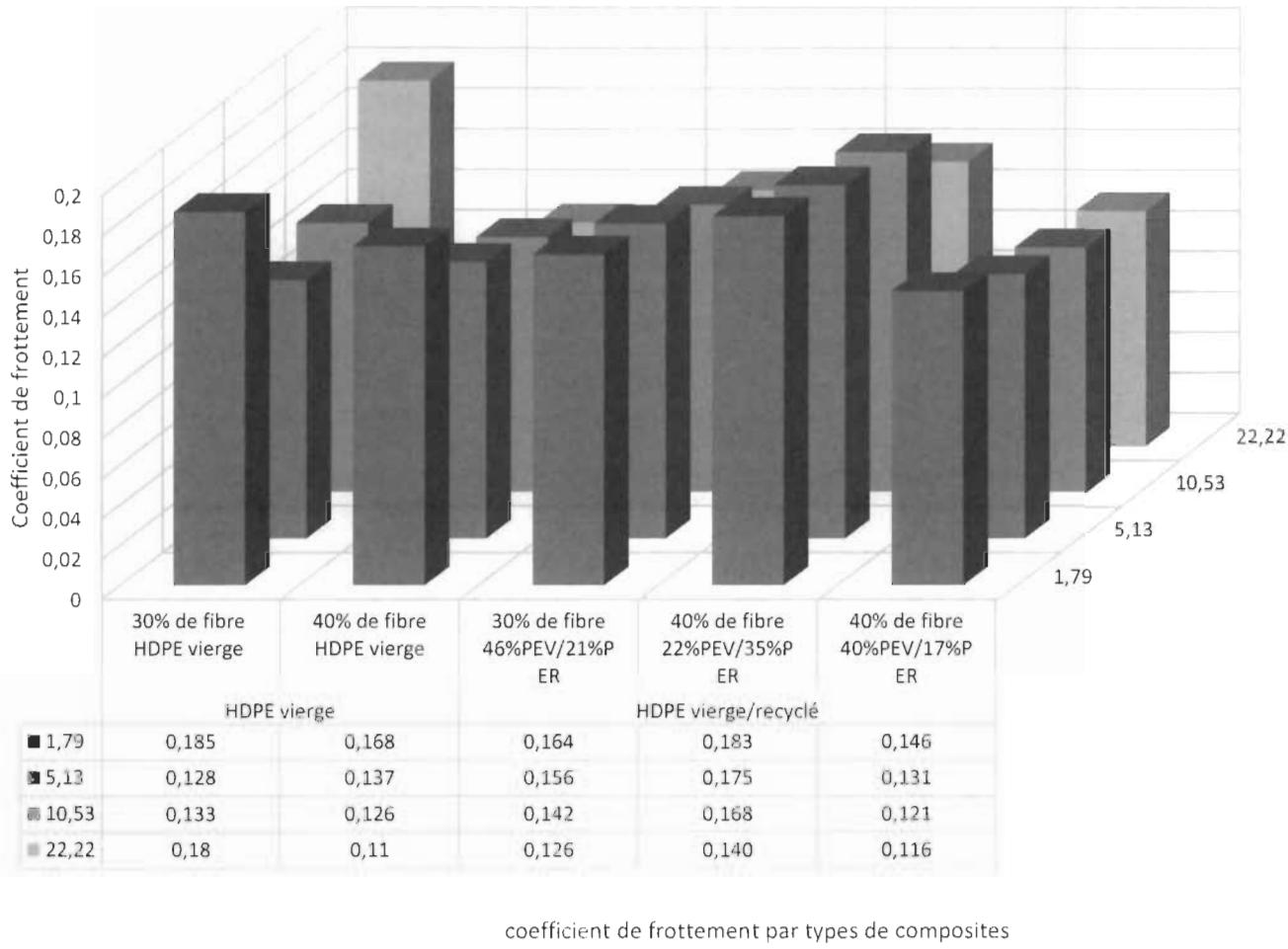


Figure 4.30 : Évolution comparative des comportements des coefficients de frottement des composites HDPE vierge/fibres et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau

À première vue, la progression de l'usure suivant les deux types de composites semble identique. En effet, suivant ces deux cas le coefficient de frottement augmente avec la diminution du taux de glissement imposé en dehors du composite HDPE vierge /30% de fibres de bouleau qui a donné la valeur de coefficient de frottement la plus élevée qui est de 0,18 pour un taux de glissement de 22,22 ce qui est hors prédition.

Cependant, les valeurs de coefficient de frottement obtenues pour le cas HDPE vierge/fibres de bouleau sont légèrement supérieures aux valeurs de coefficient de frottement obtenues pour les HDPE vierges/recyclés/fibre de bouleau.

De ce fait on peut conclure que l'ajout de HDPE recyclé dans le composite tend à réduire le coefficient de frottement.

**CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS ET
PERSPECTIVES**

5.1 – Récapitulatif

Innovant sur la scène des matériaux composites, ce projet novateur pour sa double portée offre une perspective nouvelle en ce qui concerne les engrenages en composite. L'aboutissement de ce mémoire de recherche est considéré comme étant un apport majeur dans la caractérisation du comportement thermomécanique et tribologique des engrenages en composites. Ce travail a été réalisé dans le cadre des activités du Centre de Recherche sur les Matériaux lignocellulosiques de l'UQTR aujourd'hui appelé I²E³ (Institut des d'Innovation en Écomatériaux, Écoproduits et Ecoénergies à base de biomasse) de l'UQTR.

Au chapitre I, nous avons fait une introduction générale sur les matériaux plastiques et leurs composites de fibres naturelles, applications et opportunités de développement, etc. suivi par une présentation de la problématique à cet égard ; ensuite l'objectif principal et les objectifs secondaires ont été présentés.

Dans le chapitre II, nous avons effectué une recherche bibliographique qui a permis de passer en revue les travaux existants dans le domaine de la tribologie des engrenages pour mieux comprendre le fonctionnement et les phénomènes associés à l'usure, l'échauffement des thermoplastiques et leurs composites de fibres naturelles.

Dans le chapitre III, la méthodologie utilisée pour atteindre les objectifs fixés a été présentée en détail, en commençant par l'élaboration des mélanges des composites étudiés, la méthode de fabrication de différentes éprouvettes : le moulage par injection pour les éprouvettes de traction ; et le moulage par thermocompression pour les éprouvettes à engrenages, ensuite les montages et les plans de configuration d'essais expérimentaux effectués.

Au chapitre IV, pour chacune des trois configurations d'essais (traction, thermomécanique et tribologie) et pour chacun des deux types de composites étudiés (HDPE vierge/fibre de bouleau et HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau) les différents résultats obtenus ont été présentés et ont fait l'objet d'analyses. En effet nous avons présenté pour chaque type de composites les différents résultats dans des tableaux et de graphiques. Il s'agit des résultats de modules et de contraintes en traction ; de perte de masse des éprouvettes en thermomécanique, d'usure en tribologie, du comportement thermique en thermomécanique et en tribologie et du comportement du coefficient de frottement.

Par la suite nous avons effectué des analyses comparatives des résultats respectifs des deux types de composites HDPE vierge/fibres de bouleau et HDPE vierge/ recyclé/fibres de bouleau.

Et pour finir, le chapitre V conclut en faisant rappeler les résultats importants obtenus de ce projet, les points critiques et les recommandations pour les travaux de recherche à venir.

5.2 – Conclusion et perspectives

À la lumière des divers éléments d'observation et d'analyse présentés dans le chapitre 4, notamment en ce qui concerne les comparaisons HDPE vierge/fibres de bouleau et les HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau effectué, on peut dire que les différences sont nombreuses. En effet, au niveau des analyses comparatives des essais tractions effectués, les résultats montrent clairement qu'un apport de 20% à 24% de HDPE recyclés, réduit à la fois le module et la contrainte. Toutefois on obtient des valeurs assez hautes bien qu'inférieures aux valeurs de HDPE vierges. Ceci laisse à penser que les composites HDPE recyclés peuvent être considérés pour la fabrication de pièces dépendamment du domaine d'application, notamment des applications où les contraintes appliquées sont peu importantes. Ceci pour deux raisons principales : soient l'aspect économique, et l'aspect écologique.

Pour les analyses de thermomécanique ; au niveau de la perte de masse, l'allure de la figure semble similaire entre les composites à base de HDPE vierges et les composites à base de HDPE vierge/recyclé. C'est-à-dire que la perte de masse pour chaque type de composite varie avec la vitesse de rotation et le pourcentage de fibres, et plus spécifiquement, elle varie avec le pourcentage de HDPE recyclé avec 30% de fibres et varie dans le sens inverse avec le pourcentage de HPDE recyclé avec 40% de fibres. Mais dans tous les cas, on observe une perte de masse plus importante pour les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau par rapport aux composites HPDE vierge/fibres de bouleau. Ceci s'explique par le fait que le HDPE recyclé ayant une masse volumique plus faible que le HDPE vierge est donc moins résistant à la perte de masse.

Pour l'usure, on observe un comportement contraire, en effet bien que l'usure pour chaque type de composite dépende fortement du pourcentage de fibres et du taux de glissement, on observe chez les HDPE vierge/fibres de bouleau une évolution complètement aléatoire ; tandis que pour les HDPE vierge/recyclé/fibre de bouleau, l'usure varie dans le sens inverse du taux

de glissement et des pourcentages de HDPE recyclé. Et dans tous les cas de figures, on remarque que l'usure des composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau est de loin plus faible que l'usure observée pour les composites HDPE vierges/fibres de bouleau. Ce qui est en contradiction avec le comportement observé en thermomécanique. On peut conclure que l'ajout de HDPE recyclé dans le composite réduire l'usure.

Pour ce qui est du comportement thermique ; que ce soit en thermomécanique ou en tribologie, le profil est le même ; on a la température qui augmente avec la vitesse et le pourcentage de fibres, et plus spécifiquement elle augmente aussi avec le pourcentage de HDPE recyclé dans le mélange composite. Mais dans tous les cas les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau ont fourni des valeurs de température beaucoup plus élevée que les composites HPDE vierge/fibres de bouleau. De ceci on en déduit que l'ajout du HDPE recyclé dans le composite tend à le rendre moins résistant à l'échauffement.

En ce qui concerne les pertes de couples et le coefficient de frottement respectivement en thermomécanique et en tribologie, le constat est similaire. En effet on observe des valeurs plus élevées de coefficient de frottement et de perte de couple chez les composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau. Ces valeurs augmentent avec le pourcentage de HDPE recyclé dans le mélange, la vitesse de rotation et le couple appliqué pour les couples. Et elle varie aussi dans le sens inverse de la charge appliquée et du taux de glissement pour le coefficient de frottement

Le présent travail de recherche laisse une certaine marge de manœuvre aux futurs chercheurs pour explorer d'autres aspects des engrenages en composites de polymères. Certaines recommandations pour la recherche future incluent :

Effectuer des essais en utilisant des combinaisons différentes et simultanées de composites HDPE vierge/fibres de bouleau et de composites HDPE vierge/recyclé/fibres de bouleau roue menée et menante en composites polymères, pour développer le modèle de relation d'évaluation de rendement via les performances tribomécaniques.

De varier le type de dentures pour les essais, par exemple en utilisant des roues à dentures hélicoïdales ou coniques, au lieu des roues à dentures droites.

CHAPITRE 6 : BIBLIOGRAPHIE

- [1] Agbelenko Koffi, Demagna Koffi, Lotfi Toubal. (2020) Mechanical properties and drop-weight impact performance of injection-molded HDPE/birch fiber composites. (*Polymer Testing Inpress, journal pre-proof Available online 12 November 2020*) <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106956>
- [2] P Blais, L Toubal. (2020). Single-Gear-Tooth Bending Fatigue of HDPE reinforced with short natural fiber. *International Journal of Fatigue* 141, 105857.
- [3] A Bravo, L Toubal, D Koffi, F Erchiqui (2018). Gear fatigue life and thermomechanical behavior of novel green and bio-composite materials VS high-performance thermoplastics. *Polymer Testing* 66, 403-414.
- [4] M Mejri, L Toubal, JC Cuilliére, V François. (2017). Fatigue life and residual strength of a shortnatural-fiber-reinforced plastic vs Nylon. *Composites Part B: Engineering* 110, 429-441.
- [5] A Koffi, D Koffi, L Toubal. (2016). Injection Molding Parameters Influence on PE Composites *International Journal of Engineering Research And Development* 12 (10): 29-39.
- [6] A Bravo, L Toubal, D Koffi, F Erchiqui. (2015). Damage characterization of bio and green polyethylene–birch composites under creep and cyclic testing with multivariable acoustic emissions. *Materials* 8 (11), 7322-7341.
- [7] A Bravo, L Toubal, D Koffi, F Erchiqui. (2015). Development of novel green and biocomposite materials: Tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission. *Materials & Design (1980-2015)* 66, 16-28
- [8] A Bravo, D Koffi, L Toubal, F Erchiqui. (2015) Life and damage mode modeling applied to plastic gears. *Engineering Failure Analysis* 58, 113-133.
- [9] Fayçal Mijiyawa; formulation, caractérisation, modélisation et prévision du comportement thermomécanique des pièces plastiques et composites de fibres de bois : application aux engrenages, Thèse de Ph.D, génie mécanique, UQTR 2018
- [10] Alencar Bravo; étude de l'endommagement thermomécanique des pièces en bioplastiques et composites de fibres naturelles : application aux engrenages, Thèse Ph.D, génie mécanique, UQAC & UQTR 2017
- [11] Julien Cathelin, modélisation du comportement mécanique des engrenages en plastique renforcé, Thèse Ph.D, génie mécanique, INSA de Lyon 2016
- [12] Khedidja Hacini; étude du comportement thermomécanique en flexion 3 points d'un matériau composite par les éléments finis, Mémoire génie mécanique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA 2012

- [13] L. Toubal, D. Koffi, A. Koffi, M. Mejri, A. Bravo (2018) Evaluation du comportement et de l'endommagement d'un composite thermoplastique renforcé par des fibres courtes de bois. Actes du Congrès. JET'2018 Int Cong rfor Appl Mech Les Sciences et technologies mécaniques, moteurs du développement durable : Eco-Conception, Durabilité, intelligence artificielle Energies & Matériaux Bio-Sourcés 2,3 et 4 Mai 2018, Marrakech Maroc.
- [14] Said Hamourd, Étude numérique et expérimentale de l'influence des paramètres de fonctionnement sur la température d'équilibre des engrenages en composites et nano composites de fibres naturelles, Mémoire génie mécanique, UQTR 2018
- [15] Koffi D. "Étude du comportement thermique des engrenages cylindriques droits en plastique" Thèse de Ph.D, Génie Mécanique, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada.
- [16] Emanuel Reynaud, Étude des relations structure – propriétés mécaniques de thermoplastiques renforcés par les particules inorganiques nanoscopiques; Thèse Ph.D, génie des matériaux, ISA de Lyon 2000
- [17] Philippe Blais, Approche stochastique de l'endommagement en fatigue des engrenages en composites de fibres naturelles, Maîtrise génie mécanique, UQTR 2016
- [18] François Lebel, Contrôle de la fabrication des composites par injection sur renforts, Thèse de Ph.D, génie mécanique, Polytechnique de Montréal 2012
- [19] F. Mijiyawa, D. Koffi, B. V. Kokta, and F. Erchiqui, "Formulation and tensile characterization of wood-plastic composites: Polypropylene reinforced by birch and aspen fibers for gear applications," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 28, pp. 1675-1692, 2014.
- [20] K. Ikejo, K. Nagamura, and F. G. Tutulan, "Friction loss of non-involute tooth profile gears," in *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference 2005*, vol. 5, pp. 657-663.
- [21] L. C. Chang, M. Sain, and M. Kortschot, "Effect of mixing conditions on the morphology and performance of fiber-reinforced polyurethane foam," *Journal of Cellular Plastics*, vol. 51, no. 1, pp. 103-119, 2014.
- [22] R. Gu and B. V. Kokta, "Maximization of the mechanical properties of birchpolypropylene composites with additives by statistical experimental design," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 239-263, 2010.
- [23] R. Gu and B. V. Kokta, "Effect of independent variables on mechanical properties and maximization of aspen-polypropylene composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 27-50, 2008.
- [24] R. Gu and B. V. Kokta, "Mechanical properties of pp composites reinforced with BCTMP aspen fiber," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 23, no. 4, pp. 513-542, 2010.

- [25] Y. Xue, D. R. Veazie, C. Glinsey, M. F. Horstemeyer, and R. M. Rowell, "Environmental effects on the mechanical and thermomechanical properties of aspen fiber-polypropylene composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 152-158, 2007.
- [26] A. G. Facca, M. T. Kortschot, and N. Yan, "Predicting the elastic modulus of natural fibre reinforced thermoplastics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 10, pp. 1660-1671, 2006.
- [27] R. Gu, B. V. Kokta, and G. Chalupova, "Effect of variables on the mechanical properties and maximization of polyethylene-aspen composites by statistical experimental design," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 22, no. 6, pp. 633-649, 2009.
- [28] M. Kalin and A. Kupec, "The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears," *Wear*, vol. 376, pp. 1339-1346, 2017.
- [29] W. Handbook, "Wood Handbook-Wood as an engineering material," US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, vol. 463, 1999.
- [30] M. Deepthi, M. Sharma, R. Sailaja, P. Anantha, P. Sampathkumaran, and S. Seetharamu, "Mechanical and thermal characteristics of high density polyethylene-fly ash cenospheres composites," *Materials & Design*, vol. 31, no. 4, pp. 2051-2060, 2010.
- [31] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M. N. Belgacem, and A. Dufresne, "Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: effect of silane coupling agents and fibres loading," *Composites science and technology*, vol. 67, no. 7-8, pp. 1627-1639, 2007.
- [32] D. Hull and T. Clyne, *An introduction to composite materials*. Cambridge university press 1996.
- [33] D. C. Nguyen, "Caractérisation de l'interface fibre/matrice: application aux composites polypropylène/chanvre," Troyes, 2016.
- [34] K. Dearn, S. Kukureka, and D. Walton, "Engineering polymers and composites for machine elements," Chapter, vol. 14, pp. 470-505, 2009.
- [35] V. V. Do Thi, "Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," Université de Grenoble, 2011.
- [36] A. Le Duc, "Comportement et rupture de fibres cellulosiques lors de leur compoundage avec une matrice polymère," Paris, ENMP, 2013.
- [37] Y. Xie, C. A. Hill, Z. Xiao, H. Militz, and C. Mai, "Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 7, pp. 806-819, 2010.128
- [38] M. Godet, "The third-body approach: a mechanical view of wear," *Wear*, vol. 100, no. 1 3, pp. 437-452, 1984.
- [39] Y. Berthier, "Mécanisme et tribologie", Villeurbanne, INSA, 1988.

- [40] D. Landolt, S. Mischler, and M. Stemp, "Electrochemical methods in tribocorrosion: a critical appraisal", *Electrochimica acta*, vol. 46, no. 24-25, pp. 3913-3929, 2001.
- [41] G. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering tribology*. ButterworthHeinemann, 2013.
- [42] C. Hooke, S. Kukureka, P. Liao, M. Rao, and Y. Chen, "The friction and wear of polymers in non-conformal contacts," *Wear*, vol. 200, no. 1-2, pp. 83-94, 1996.
- [43] S. Kukureka, C. Hooke, M. Rao, P. Liao, and Y. Chen, "The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact," *Tribology International*, vol. 32, no. 2, pp. 107-116, 1999.
- [44] Y. Chen, S. Kukureka, C. Hooke, and M. Rao, "Surface topography and wear mechanisms in polyamide 66 and its composites," *Journal of materials science*, vol. 35, no. 5, pp. 1269-1281, 2000.
- [45] A. Breeds, S. Kukureka, K. Mao, D. Walton, and C. Hooke, "Wear behaviour of acetal gear pairs," *Wear*, vol. 166, no. 1, pp. 85-91, 1993.
- [46] K. Hee and P. Filip, "Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings," *Wear*, vol. 259, no. 7-12, pp. 1088- 1096, 2005.
- [47] M. Mosleh, P. J. Blau, and D. Dumitrescu, "Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials," *Wear*, vol. 256, no. 11-12, pp. 1128-1134, 2004.
- [48] S. Senthilvelan and R. Gnanamoorthy, "Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears," *Polymer testing*, vol. 25, no. 1, pp. 56-62, 2006.
- [49] S. Senthilvelan and R. Gnanamoorthy, "Effect of rotational speed on the performance of unreinforced and glass fiber reinforced Nylon 6 spur gears," *Materials & design*, vol. 28, no. 3, pp. 765-772, 2007.
- [50] H. Düzçükoğlu, "Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity," *Tribology International*, vol. 42, no. 8, pp. 1146-1153, 2009.
- [51] R. M. Rowell, A. R. Sanadi, D. F. Caulfield, and R. E. Jacobson, "Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities," *Lignocellulosicplastic composites*, pp. 23-51, 1997.
- [52] N. Wright and S. Kukureka, "Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears," *Wear*, vol. 251, no. 1-12, pp. 1567-1578, 2001.
- [53] T. Hirogaki, E. Aoyama, T. Katayama, S. Iwasaki, Y. Yagura, and K. Sugimura, "Design systems for gear elements made of cotton fiber-reinforced plastics," *Composite structures*, vol. 66, no. 1, pp. 47-52, 2004.
- [54] K. Mao, "A new approach for polymer composite gear design," *Wear*, vol. 262, no. 3-4, pp. 432-441, 2007.

- [55] J. Moder, F. Grün, F. Summer, M. Kohlhauser, and M. Wohlfahrt, "Application of high-performance composite polymers with steel counterparts in dry rolling/sliding contacts," *Polymer Testing*, vol. 66, pp. 371-382, 2018.
- [56] K. Mao, W. Li, C. Hooke, and D. Walton, "Polymer gear surface thermal wear and its performance prediction," *Tribology International*, vol. 43, no. 1-2, pp. 433-439, 2010.
- [57] N. Tsukamoto, "Argument on plastic gears for power transmission," *JSME international journal. Ser. C, Dynamics, control, robotics, design and manufacturing*, vol. 38, no. 1, pp. 1-8, 1995.
- [58] F. R. Estabrook, "Why not try plastic gear," Penton/IPC, Cleveland, 1982.
- [59] C. Adams, *Plastics gearing: selection and application*. CRC, 1986.
- [60] J. Cathelin, "Modélisation du comportement mécanique des engrenages en plastique renforcé," *These*, Lyon, INSA, 2014.
- [61] Z. SMITH and D. SHERIDAN, "Processing and the design of precision plastic gears," *Power transmission engineering*, 2007.
- [62] G. Crippa and P. Davoli, "Comparative fatigue resistance of fiber reinforced nylon 6 gears," *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN*, vol. 117, pp. 193-193, 1995.
- [63] P. K. Singh and A. K. Singh, "An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears," *Tribology International*, vol. 118, pp. 264-272, 2018.
- [64] D. N. SAHEB and J. P. JOG, "Natural Fiber Polymer Composites: A Review," *Polymer Engineering Group, Chemical Engineering Division, National Chemical Laboratory*, 1999
- [65] D Koffi, A Bravo, L Toubal, F Erchiqui. (2016) Optimized use of cooling holes to decrease the amount of thermal damage on a plastic gear tooth. *Advances in Mechanical Engineering* 8 (5), 1687814016638824
- [66] C. J. Hooke, K. Mao, D. Walton, A. R. Breeds, and S. N. Kukureka, "Measurement and prediction of the surface temperature in polymer gears and its relationship to gear wear," *Journal of Tribology*, vol. 115, no. 1, pp. 119-124, 1993
- [67] Agbetossou* N., Koffi D., Tiem S. K., Afio A., Attipou K. (2020). Modeling and Prediction of Wear for Gears in Plastics Materials and their Composites. *International Journal of Engineering Research and Technology* 9(7): <http://dx.doi.org/10>.
- [68] F. K. Wotodzo*, K. Kassegne, D. Koffi (2019). MECHANICAL CHARACTERIZATION OF COMPOSITE GEARS IN NATURALFIBERS (HDPE/40% BIRCH) BY MODELING AND NUMERICAL SIMULATION. *Int JEsRT*. 8(7): 139-149.
- [69] K. F. WOTODZO* 1, D. KOFFI 2, K. A. KASSEGNE 3, (2018). Modeling and Numerical Simulation of the Mechanical Behaviour of Natural Fiber Composite Gear: case of HDPE/40% Birch (HDPE40 : High Density Polyéthylène 40% de bouleau).

International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) (July 2018)? 14
(7v2): 32-41.