

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MEMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN INGÉNIERIE-CONCENTRATION GÉNIE
MÉCANIQUE

PAR
FIRAS MANAI

ÉTUDE DES PERFORMANCES DE TRIBOLOGIE DES COMPOSITES DE
FIBRES NATURELLES-THERMOPLASTIQUE/BOULEAU :
FROTTEMENT ET USURE

AVRIL 2019

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 DES PERFORMANCES DE TRIBOLOGIE DES COMPOSITES DE
FIBRES NATURELLES-THERMOPLASTIQUE/BOULEAU :
FROTTEMENT ET USURE**

Ce mémoire a été dirigé par :

Demagna Koffi, Ing., PhD., Directeur de recherche, Professeur titulaire, Université du Québec
à Trois Rivières

Jury d'évaluation du mémoire :

Gilbert Lebrun, Ing, PhD, Professeur titulaire, Université du Québec à Trois Rivières

Dr. Komla Kassegne, Maître de conférences, ENSI, Université de Lomé

Demagna Koffi, Ing, PhD., Directeur de recherche, Professeur titulaire, Université du Québec
à Trois Rivières

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements tout d'abord à :

Tout le cadre du département de Génie Mécanique

Tous les professeurs

Tous mes collègues

Pour leur soutien et leur encouragement durant les années que j'ai passé au sein de cet établissement.

Je remercie tout particulièrement Dr. **KOFFI DEMAGNA**, Professeur titulaire au département du génie mécanique qui m'a honoré par son encadrement, pour son soutien, sa disponibilité et surtout sa patience durant toute la période de ce travail.

Mes remerciements se tournent également vers mes collègues de travail pour leurs critiques constructives à l'égard de ce projet et pour leur soutien et encouragement durant les années qu'on a passées ensemble.

Toute ma gratitude et mes remerciements les plus chaleureux à toute **ma famille, spécialement mes parents** qui n'ont pas cessé de m'encourager depuis ma naissance.

Mes remerciements enfin à *toutes les personnes* qui m'ont gracieusement accordé de leur temps, pour parvenir à ce que je suis maintenant.

RÉSUMÉ

Récemment, les composites en polymère renforcé de fibres naturelles ont émergé dans le paysage industriel, se distinguant comme une alternative écologique et rentable pour les matériaux conventionnels. Par conséquent, la tendance industrielle actuelle se précipite vers l'exploitation de ce genre de matériau dans plusieurs domaines.

La disponibilité des fibres naturelles et la facilité de la fabrication ont poussé les chercheurs à évaluer la faisabilité de son application en tant que renforcement dans des matrices de polymère pour des applications d'engrenages. D'ailleurs, cette étude s'intéresse à la caractérisation des performances de tribologie d'un nouveau matériau composite en thermoplastique (polyéthylène à haute densité) renforcé par des fibres naturelles de bouleau. En effet, elle tient à évaluer l'influence des paramètres de fonctionnement tels que la vitesse, la charge, le matériau, la température sur les performances de tribologie des engrenages.

L'interprétation des mécanismes d'usure des engrenages en polymère s'avère complexe à cause de la superposition des effets des paramètres ainsi que la variation de l'interaction des paramètres de fonctionnement avec la position de contact des dents au cours de l'engrènement. C'est pour cela qu'au cours de cette étude, les variables de fonctionnement ont été testées avec plus de précision sur des formes géométriques régulières plus simples à l'aide d'un dispositif à double disque permettant la simulation du mouvement des engrenages en HDPE/bouleau en roulement combiné au glissement. Cette démarche a permis aussi la comparaison des résultats avec ceux trouvés du test des engrenages.

Des tests ont été effectués sans lubrification sur une gamme de charges, de vitesses de roulement et de rapports de glissement en changeant à chaque fois la composition en taux de fibres du matériau testé parallèlement sur les deux machines à disques et à engrenages.

Les informations et les analyses recueillies ont révélées que la fraction massique, la présence d'un agent de couplage ainsi que les variations des paramètres de fonctionnement influencent de manière significative le comportement mécanique et de tribologie des composites. En effet, les composites chargés à 40% en masse de fibres et traités avec un agent de couplage étaient les plus résistants à l'usure. Par ailleurs, l'augmentation de la charge, du taux du glissement et de la vitesse de rotation a entraîné une augmentation du taux d'usure. Le coefficient de frottement est inversement proportionnel à ces variables. La visualisation thermique au cours des essais effectués sur les disques a montré une proportionnalité entre la force de frottement et la température de surface mesurée. Ainsi, l'endommagement des échantillons est relié directement à la hausse de température au point de contact. En comparaison avec les résultats de température des disques sollicités aux mêmes conditions de fonctionnement, la température maximale mesurée sur les engrenages testés était beaucoup moins élevée. Ceci est probablement dû aux phénomènes reliés à la géométrie et au processus d'engrènement des engrenages.

En conclusion, les engrenages en composite de HDPE/bouleau peuvent être performants à des conditions de fonctionnement particulières telles que : petites charges, faible taux de glissement, faible vitesse de rotation.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte :	1
1.1.1 Matériaux composites :	1
1.1.2 Choix de la fibre naturelle :	3
1.1.3 Impacts environnementaux des fibres naturelles	7
1.1.4 Utilité des composites de fibres naturelles :	8
1.2 Problématique :	11
1.3 Questions de recherche :	12
1.4 Objectif du travail :	12
1.5 Contenu du mémoire :	12
CHAPITRE 2 – RECENSION DES ÉCRITS ET CADRE THÉORIQUE	14
2.1 Préambules :	14
2.2 Références scientifiques :	14
2.2.1 Généralités sur le comportement de tribologie des composites en polymère à fibres naturelles :	14
2.2.2 Effet de la charge appliquée sur le comportement de tribologie des NFPC :	18
2.2.3 Effet de l'agent de couplage sur le comportement de tribologie des composites polymère-fibres naturelles :	21
2.2.4 Effet du pourcentage volumique en fibres sur le comportement des composites polymère-fibres naturelles :	26
2.2.5 Influence de l'humidité sur les propriétés des NFPC :	27
2.2.6 Influence de la température sur les performances de tribologie	28
2.2.7 Effet de la vitesse sur le comportement de tribologie des NFPC :	32
2.2.8 Modes de bris des engrenages :	35
2.2.9 Simulation du contact des engrenages :	36
2.2.10 Effet du taux de glissement	41
2.3 Mesure de l'usure	43
CHAPITRE 3 – MÉTHODOLOGIE	45
3.1 Matériaux :	46
3.2 Préparation des échantillons :	46
3.3 Etude expérimentale :	51
3.3.1 Essai sur banc d'engrenages :	51
3.3.1.1 Présentation du dispositif :	51

3.3.1.2	Principe de fonctionnement :	52
3.3.1.3	Plan d'expérience :	53
3.3.2	Essai normalisé de tribologie :	54
3.3.2.1	Présentation du dispositif :	54
3.3.2.2	Principe de fonctionnement :	55
3.3.2.3	Plan d'expérience :	61
CHAPITRE 4 – RÉSULTATS ET ANALYSES		63
4.1	Comportement de tribologie– essai normalisé de tribologie :	63
4.1.1.1	Effet du renforcement en fibres du composite :	63
4.1.1.2	Effet de la charge :	65
4.1.1.3	Effet du taux de glissement :	69
4.1.1.4	Effet de la vitesse de rotation :	70
4.1.2	Comportement du frottement et du coefficient de frottement μ	73
4.1.2.1	Effet du renforcement en fibres du composite :	73
4.1.2.2	Effet de la charge :	75
4.1.2.3	Effet de la vitesse de rotation :	77
4.2	Comportement de tribologie - essais sur banc d'engrenages :	78
4.2.1	Effet de la teneur en fibres naturelles :	79
4.2.2	Influence des paramètres de fonctionnement sur l'usure des engrenages	80
4.3	Comparaison des données sur les deux types de tests :	82
4.4	Effet de la température :	84
CHAPITRE 5 – CONCLUSION		88
5.1	Récapitulation :	88
5.2	Conclusion :	89
5.3	Recommandations pour travaux futurs et perspectives	90
RÉFÉRENCES		92
ANNEXES		99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison entre les propriétés physiques et mécaniques de quelques fibres naturelles et fibres synthétiques [2-4].	4
Tableau 2 : Comparaison entre des fibres végétales et des fibres synthétiques utilisé dans les composites [6].	5
Tableau 3 : Caractéristiques morphologiques des fibres de bouleau de pâte Kraft [8].	7
Tableau 4 : Comparatif des impacts environnementaux du cycle de vie des palettes de transport en PP renforcées de fibre de verre et en roseau de Chine [10].	8
Tableau 5 : Les applications des NFPC dans l'industrie automobile [10, 26, 27].	10
Tableau 6 : Evolution de la demande en fibres naturelles exprimées en tonne dans le marché automobile allemand [29, 30].	11
Tableau 7 : Effet de la teneur en fibres sur le comportement mécanique du composite [54].	26
Tableau 8 : Paramètres des engrenages conçus.	48
Tableau 9 : Variables de fonctionnement.	53
Tableau 10 : Variables de fonctionnement testées	62
Tableau 11 : Résultats des essais effectués sur les disques montrant l'effet de la teneur en fibres sur l'usure à une vitesse de 500 tr/min, une charge de 199 N et un taux de glissement de 22.22%.	99
Tableau 12 : Résultats des essais effectués sur les disques 40 % en masse de fibres montrant l'effet de la charge appliquée sur l'usure à une vitesse de 500 tr/min et un taux de glissement de 22.22%.	100
Tableau 13 : Résultats des essais effectués sur les disques 40% en masse de fibres montrant l'effet du taux de glissement sur l'usure à une vitesse de 500 tr/min et une charge de 302 N	101
Tableau 14 : Résultats des essais effectués sur les disques 40% en masse de fibres montrant l'effet de la vitesse de rotation sur l'usure à une charge de 302 N et un taux de glissement de 22.22%.	102
Tableau 15 : Résultats des essais effectués sur les engrenages montrant l'effet de teneur en fibres sur l'usure à une vitesse de 500 tr/min et un couple de 4N.m.	102
Tableau 16 : Résultats des essais effectués sur des engrenages de 40% en masse de fibres montrant l'effet du couple sur l'usure à une vitesse de rotation de 500 tr/min.	103
Tableau 17 : Résultats des essais effectués sur des engrenages de 40% en masse de fibres montrant l'effet du couple sur l'usure à une vitesse de rotation de 1000 tr/min.	103
Tableau 18 : Résultats des essais effectués sur des engrenages de 40% en masse de fibres montrant l'effet du couple sur l'usures à une vitesse de rotation de 1500 tr/min.	104

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Classification des différents types de composites.	3
Figure 2 : Photo du bouleau jaune.....	6
Figure 3 : Comparatif du taux d'usure et du coefficient de frottement des composites respectifs C-SCRCP et C-GRP [31].	15
Figure 4 : Comparatif du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée entre a) PP net ; b) Jute/PP [32].	16
Figure 5 : Coefficient de frottement (a) et taux d'usure (b) du composite :polyester/fibres de coton en fonction du taux volumique de fibres à deux vitesses de glissement : (- - -) 32 m/s ; (—) 10 m/s.	17
Figure 6 : Coefficient de frottement à différentes charges et à une vitesse de glissement de 50 cm/s [39].....	18
Figure 7 : Coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée pour jute/PP.	19
Figure 8 : Variation du taux d'usure en fonction de la charge appliquée pour jute/PP.	19
Figure 9 : Perte de masse en fonction de la charge appliquée à différentes combinaisons de pourcentage volumique d'un composite de polyester renforcé par des fibres de sisal.	20
Figure 10 : Interaction de la cellulose envers le polyéthylène maléaté [49].	21
Figure 11 :Variation du taux d'usure avec la charge pour les composites renforcés de fibres de jute non-traité (UT), les composites de PP renforcés de jute traité avec la solution MA-g-PP (CT) et les composites de PP renforcé de fibre de jutes avec MA-g-PP mélangé à la fusion (MT).	23
Figure 12 : Coefficient de frottement par rapport à la distance de glissement du NP et des composites T-OPRP et UT-OPRP, pour une charge appliquée de 50 N et une vitesse de glissement de 2,8 m/s [51].....	24
Figure 13 : Taux d'usure spécifique en fonction de la distance de glissement du NP et des composites T-OPRP et UT-OPRP, pour une charge appliquée de 50 N et une vitesse de glissement de 2,8 m / s [51].....	25
Figure 14 : Effet du pourcentage volumique de fibre et de l'agent de couplage sur le comportement mécanique du composite PP/ bouleau.	27
Figure 15 : Température de surface mesurée des engrenages de nylon renforcé et non renforcé à (a) 1,5 Nm et (b) 2 Nm [70, 71].	30
Figure 16 : Allure de la température, du frottement et de l'usure pour un rapport de glissement de 14% et une charge de 400 N [75].	31
Figure 17 : Taux d'usure de l'OPRP/ SS à différentes charges appliquées à trois vitesses de glissement.....	33
Figure 18 : Variation du taux d'usure spécifique en fonction de la charge à des vitesses de glissement différentes pour un composite Jute/PP [32].	33
Figure 19 : Taux d'usure spécifique en fonction de la vitesse de glissement à 50N de charge appliquée pour différentes orientations de fibres de kénafe dans le composite d'époxy.	34
Figure 20 : Modes d'endommagement en fonction de la charge normale.	35
Figure 21 : Les lignes de contact réels et théoriques pour une paire de dents d'engrenage en polymère [85, 86].	36
Figure 22 : Mécanisme de roulement et glissement au cours de l'engrènement [94].....	38
Figure 23 : Relation entre les dents d'engrenage et les disques en contact [95].	39

Figure 24 : (a) Allures de la vitesse de glissement (V_{slide}) et de roulement (V_{roll}), et (b) taux de glissement pour un contact d'engrenage en polymère: zones grises représentant des zones simulées lors de l'utilisation d'essais sur deux disques [87]	40
Figure 25 : Variation du taux d'usure avec le rapport de glissement pour : POM non renforcé à une charge 200 N (carreaux blancs) et POM renforcé avec PTFE à une charge 300 N (carreaux noirs) [91].....	41
Figure 26 : Variation du taux d'usure avec le taux de glissement pour : PA66 non renforcé (carreaux blancs) et PA66 renforcé par du PTFE (carreaux noirs) [91]	42
Figure 27 : Schéma explicatif du procédé de fabrication des bio composites par moulage.....	47
Figure 28 : Etat des engrenages fabriqués de 0,10,20,30 et 40% wt.%	49
Figure 29 : Etat de quelques disques fabriqués	50
Figure 30 : Banc d'essai à engrenages	52
Figure 31 : Tribomètre TE 53 « PLINT PARTNER ».....	54
Figure 32 : Vue schématique du tribomètre : 1- moteur d'entraînement, 2- tachymètre, 3- accouplement, 4- capteur de force, 5- échantillon, 6- porte échantillon, 7- contre face, 8- support de poids, 9- système de transmission, 10- poids mort.....	55
Figure 33 : Chaîne de transmission du tribomètre	56
Figure 34 : Illustration des disques et de LVDT	57
Figure 35 : Montage disque sur disque avec schématisation de la force de la charge appliquée	58
Figure 36 : Effet des fibres de bouleau sur le taux d'usure du composite HDPE/bouleau	64
Figure 37 : Taux d'usure en fonction de la charge pour un taux de glissement de 22.22 % et une vitesse de rotation de 500 tr/min.....	66
Figure 38 : Courbe du pourcentage de perte de masse (g) en fonction de la charge (N) pour un taux de glissement de 22.22% et une vitesse de rotation de 500 tr/min.....	67
Figure 39 : Usure en fonction du nombre de cycles pour 3 charges différentes à 500tr/min et $T_g = 22.22\%$	68
Figure 40 : Etat de surface des disques après l'essai	69
Figure 41 : Evolution du taux d'usure en fonction du taux de glissement pour une charge de 302N et une vitesse de 500tr/min.....	70
Figure 42 : Variation du taux d'usure en fonction de la vitesse de rotation pour une charge de 302N et un taux de glissement de 22.22%	71
Figure 43 : Etat de quelques disques après le tests sous une charge de 302 N, un taux de glissement 22.22 % et une vitesse de rotation 500 tr/min.....	72
Figure 44 : Etat d'endommagement de l'échantillon testé à 800tr/min pour une charge de 302 N et taux de glissement de 22.22 %	72
Figure 45 : L'influence du taux de renforcement sur le frottement du composite HDPE/bouleau.....	73
Figure 46 : Effet de la teneur en fibre de bouleau sur le coefficient de frottement du composite	74
Figure 47 : Influence de la charge sur le frottement pour une vitesse de 500 tr/min et un taux de glissement de 22.22 %.....	75
Figure 48 : Influence de la charge appliquée sur le coefficient de frottement	76
Figure 49 : Courbe du coefficient de frottement en fonction de la charge.....	77
Figure 50 : Variation du coefficient de frottement pour des vitesses différentes à une charge de 302 N et un taux de glissement de 22.22 %	77

Figure 51 : Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de rotation pour une charge de 302 N et un taux de glissement de 22.22 %	78
Figure 52 : Influence de la teneur en fibre sur l'usure des engrenages pour une vitesse de 500 tr/min et un couple de 4 N.m	80
Figure 53 : Comparatif de l'usure en fonction du couple appliqué sur des engrenages de 40% m. de fibre de bouleau à différentes vitesses.....	81
Figure 54 : Photos de formes d'endommagement des engrenages	82
Figure 55 : Comparatif du taux d'usure en fonction de la charge entre les disques et les engrenages	83
Figure 56 : Comparatif entre la température d'un système d'engrenages et de disques testés au mêmes conditions	84
Figure 57 : Profil de température infrarouge instantanée pour deux tests fonctionnant dans les mêmes conditions (a) engrenages et (b) disques	85
Figure 58 : Température de surface au point de contact en fonction du temps pour différents taux de glissement à une charge de 200N et une vitesse de 500 tr/min	86
Figure 59 : Effet du taux de glissement sur la température moyenne maximale pour une charge de 200N et une vitesse de rotation de 500 tr/min	87

LISTE DES ABREVIATIONS

Acronyme	Désignation en français	Désignation en anglais
HDPE	Polyéthylène à haute densité	High density polyethylene
WPC	Composite à fibres de bois	Wood-plastic composites
MAPE	Maléate de polyéthylène	Maleated polyethylene
ISO	Organisation internationale de normalisation International	Organization for Standardization
LMEM	Laboratoire de Mécanique et Éco-Matériaux	Laboratory of Mechanics and Eco-Materials
CIPP	Centre intégré en pâtes et papier	Integrated pulp and paper center
ASTM	Société américaine pour les essais et les matériaux	American Society for Testing and Materials
UQTR	Université du Québec à Trois Rivières	University of Quebec at Trois-Rivières
CAD	Dollar canadien	Canadian dollar
NFPC	Composite en polymère à fibres naturelles	Natural fiber polymer composite
CML	Centrum voor Milieukunde Leiden : Centre de l'Université de Leiden ayant développé un modèle de caractérisation pour l'Analyse de Cycle de Vie proposant des facteurs d'impact pour différentes indicateurs environnementaux.	Center of the University of Leiden
UP	Polyester insaturé	Unsaturated polyester
PET	Poly téréphtalate d'éthylène	Polyethylene terephthalate
CFN	Composite à fibres naturelles	Natural fiber composite
MA-g-PP	polypropylène greffé anhydride maléique	Maleic anhydride-graft- polypropylene

T-OPRP	Polyester renforcé à l'huile de palme traitée	Treated oil palm reinforced polyester
UT-OPRP	Polyester renforcé au palmier à huile non traité	Untreated oil palm reinforced polyester
NP	Polyester net	Neat polyester
BOR	Bloc sur anneau	Block-on-ring
MEB	Microscopie électronique à balayage	Scanning Electron Microscopy
BFRP	Polyester renforcé de fibres de bétel	Betel fiber reinforced polyester
THM	Thermo-hygro-mécanique	Thermo-hygro-mechanical
T_g	Température de transition vitreuse	Glass transition temperature
SCRP	Polyester renforcé par des fibres de canne à sucre	Sugar cane reinforced polyester
GRP	Polyester renforcé par fibres de verre	Glass reinforced polyester
SS	Acier inoxydable	Stainless steel
P-O	Orientation parallèle	Parallel orientation
AP-O	Orientation antiparallèle	Antiparallel orientation
N-O	Orientation normale	Normal orientation
NE	Epoxy net	Neat epoxy
PTFE	Polytétrafluoroéthylène	Polytetrafluoroethylene
POM	Polyoxyméthylène	Polyoxymethylene
PA66	Polyamide 66	Polyamide 66
TMP	Pâte thermomécanique	Thermomechanical pulp
AC	Agent de couplage	Coupling agent
PI	Proportionnel intégral	Proportional integral

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte :

1.1.1 Matériaux composites :

Depuis l'aube des temps, les matériaux utilisés par l'être humain ont évolué continuellement mais avec une rapidité extrêmement variable au cours de l'histoire. A l'ère préhistorique, les seuls matériaux utilisés étaient les matériaux naturels. Les romains, à leur tour, ont augmenté la marge de disponibilité des matériaux en perfectionnant l'usage des céramiques, du verre, ainsi que l'argent, l'or, l'étain, le plomb, le bronze et le fer martelé etc... Les ingénieurs du moyen âge ont contribué à ce cheminement par l'utilisation des matériaux de génie civil. Arrivant au XIX^e siècle puis au XX^e, l'évolution était d'impact très vaste et profond sur le monde des matériaux. On a vécu l'apparition des polymères et matériaux fonctionnels présentant de très grandes valeurs ajoutées au monde des matériaux.

Actuellement, les révolutions technologiques sont rendues possibles par le développement des matériaux et des ressources énergétiques. Du savoir-faire à la science, on peut dire que l'homme a toujours réussi à adapter les ressources naturelles à ses besoins pour se trouver enfin devant une situation où à la fois on a enrichi le choix des matériaux mais augmenté la compétitivité entre les matériaux pour bien répondre aux exigences des cahiers des charges.

Dans le monde des matériaux, on a coutume d'avoir trois grandes familles (métaux et alliages, verre et céramique) sur lesquelles on peut rajouter la famille des polymères et élastomères et la famille des mousses. Ces différents matériaux peuvent se combiner et donner des matériaux composites. Découverte après découverte, on ne peut qu'affirmer qu'on ajoute

des matériaux plus qu'on ne remplace, c'est-à-dire que le monde des matériaux s'enrichit jour après jour.

Les matériaux composites sont fabriqués à partir de deux ou plusieurs matériaux - souvent ceux qui ont des propriétés très différentes. Du coup, les matériaux combinés travaillent ensemble pour donner au composite résultant des propriétés uniques.

Cependant, à l'intérieur du composite, les différents matériaux sont facilement distinguables, car ils ne se dissolvent pas et ne se mélangent pas les uns aux autres.

On peut constater l'existence des composites naturels chez les animaux et les plantes comme le cas du bois qui est un composite ; il est fabriqué à partir de longues fibres de cellulose (un polymère) maintenues ensemble par une substance beaucoup plus faible appelée lignine. La cellulose est également présente dans le coton, mais sans la lignine pour la lier, c'est pour cela qu'elle est beaucoup plus faible. Les deux substances faibles - la lignine et la cellulose - forment ensemble une substance beaucoup plus forte.

L'os dans le corps est aussi un composite. Il est fabriqué à partir d'un matériau dur mais cassant appelé hydroxyapatite (qui est principalement du phosphate de calcium) et d'un matériau souple appelé collagène (qui est une protéine). Le collagène est également présent dans les cheveux et les ongles. En soi, il ne serait pas très utile dans le squelette, mais sa combinaison avec l'hydroxyapatite donne à l'os les propriétés nécessaires pour soutenir le corps.

Ainsi, la combinaison de deux phases différentes, par exemple un polymère tel que le polypropylène et de la fibre de verre, donne un matériau beaucoup plus intéressant du point de vue mécanique que le polypropylène seul, mais aussi à un coût moindre que la fibre de verre seule.

Auparavant, les matériaux composites traditionnels étaient constitués de matrices thermodurcissable ou thermoplastique renforcées généralement de fibre de carbone ou de verre. Toutefois, ces dernières années, les fibres naturelles entrent en jeu grâce à leurs bonnes

caractéristiques environnementales et leur caractère biodégradable tout en diminuant le coût. Comme l'indique le figure 1, on distingue trois catégories principales de composites : les composites renforcés par des particules, les composites renforcés par des fibres et les composites structuraux [1].

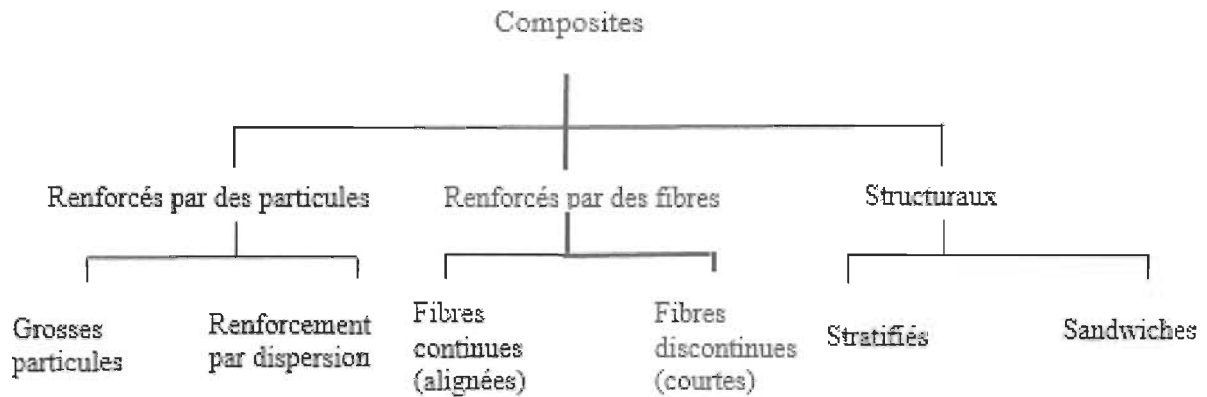


Figure 1 : Classification des différents types de composites.

1.1.2 Choix de la fibre naturelle :

Depuis l'antiquité, l'homme a eu recours aux matériaux composites renforcés de fibres naturelles. Les premiers matériaux composites créés par l'homme étaient à base de bois. A titre d'exemple, la construction des murs, à l'ancienne Egypte se faisait avec de l'argile mélangé avec la paille.

Depuis ce temps, l'homme n'a jamais cessé de montrer son intérêt aux fibres naturelles pour plusieurs raisons. En effet, cette utilisation a désormais augmenté dans le temps pour toucher plusieurs secteurs et domaines, appuyée par les amis de la nature puisque les impacts environnementaux des fibres naturelles sont beaucoup moindres que les fibres artificielles. En plus, à des prix réduits, les fibres naturelles peuvent atteindre des propriétés mécaniques intéressantes. Il est très important aussi de valoriser une ressource locale dans un pays forestier comme au Canada où le bois représente non seulement une matière première caractéristique

mais aussi une culture. Bien que ces propriétés mécaniques soient remarquablement au-dessous de celles des fibres synthétiques, il n'en demeure pas moins que leur application comme renfort dans les matériaux composites est tellement intéressante. Le tableau 1 fait la comparaison entre quelques caractéristiques déterminantes en vue d'exploitation entre les fibres naturelles et les fibres synthétiques comme la fibre de verre :

Tableau 1 : Comparaison entre les propriétés physiques et mécaniques de quelques fibres naturelles et fibres synthétiques [2-4].

	Nom de la fibre	Densité (g/cm^3)	Diamètre (mm)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la rupture (%)
Fibres naturelles	Jute	1.46	40-350	248-800	3.2-30	1.5-2.5
	Kenaf	1.45	70-250	930	53	1.6
	Sisal	1.45	50-300	530-640	9.4-22	3-7
Fibres synthétiques	Verre-E	2.55	< 17	3200-3400	72-73	3.4-4.8
	Carbone	1.7-1.9	8.2	2550-3500	200-230	1.3-1.5
	Aramide	1.4	11.9	300	124	2.5

Il est indiscutable que les fibres synthétiques ont des propriétés mécaniques toujours supérieures aux autres types de fibres. Cependant, les fibres naturelles se démarquent par leur compatibilité à des applications spécifiques.

En effet, dans l'industrie de l'emballage, on n'a pas besoin d'avoir les meilleurs caractéristiques mécaniques possibles, par contre, on cherche un matériau qui assure la biodégradabilité, la biocompatibilité, la perméabilité sélective ou encore les propriétés physico-

mécaniques modifiables d'où le grand intérêt aux matériaux composites en polymère à fibres naturelles [5].

De surcroît, les fibres naturelles offrent une très grande variété d'espèces et de caractéristiques ce qui donne une bonne marge de choix de la fibre correspondant à l'application souhaitée. Il est encore avantageux d'utiliser des fibres naturelles si la ressource est à proximité afin de réduire au maximum le coût de la production et le transport et soutenir les industries locales. Les fibres végétales ont un coût relativement faible par rapport aux fibres de carbone ou aux fibres de kevlar qui représentent la famille des fibres synthétiques. Par ailleurs, les fibres végétales se démarquent par leur masse volumique relativement faible par rapport aux fibres synthétiques, ce qui explique l'usage croissant des biocomposites dans le secteur automobile où la légèreté est un critère très recherché. Le tableau 2 présente un comparatif entre les fibres naturelles et quelques autres types de fibres utilisées dans les composites.

Tableau 2 : Comparaison entre des fibres végétales et des fibres synthétiques utilisés dans les composites [6].

Propriété	Fibre de Lin	Fibre de verre	Fibre de carbone	Fibre d'aramide (Kevlar)	Acier	Aluminium
Masse volumique (kg/m^3)	1450	2500	1800	1450	7850	2700
Energie nécessaire à la production Mj/kg	4-15	30-55	130	NC	25-57	155-222
Prix indicatif au m^2 (Dollar canadien)	2-11	4.5-15.5	30-47	61-108	(épaisseur de 0.3 mm) 1.5-5	(épaisseur de 0.3 mm) 3-7.5

Beaucoup d'autres composites à fibres naturelles ont été exploités dans les industries locales. Particulièrement, ce sujet parlera des composites à fibres de bouleau jaune.

Présentation du bouleau jaune :

Le bouleau jaune (voir figure 2) est une espèce d'arbre de la famille des Betulaceae. Ce grand arbre pouvant vivre jusqu'à 150 ans est indigène au nord-est de l'Amérique du Nord. Le bois du bouleau est très recherché comme bois d'œuvre dans l'est du Canada. Il est utilisé presque dans tous les domaines grâce à sa dureté comme pour le tournage et le placage, dans l'industrie papetière, on en fait du contre-plaqué, des meubles, des cercueils, des bâtons à café, des épingles à linge, des cure-dents, des manches à balais, etc... Les Amérindiens utilisaient son écorce pour fabriquer des paniers, des paillasses, du papier à message, des abris (comme les wigwams) ainsi que les fameux canots servant à traverser les lacs et les rivières. Le terme merisier est un canadianisme qui désigne bouleau. Depuis 1993, il est considéré comme l'arbre emblématique du Québec [7].



Figure 2 : Photo du bouleau jaune.

Le tableau 3 étale quelques caractéristiques morphologiques des fibres du bouleau :

Tableau 3 : Caractéristiques morphologiques des fibres de bouleau de pâte Kraft [8].

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

1.1.3 Impacts environnementaux des fibres naturelles

Concevoir un matériau fiable et efficace n'est plus tout ce qu'on demande. Les amis de la nature et de l'écosystème ont réclamé récemment l'une des exigences les plus prégnantes : c'est le critère biologique qui s'impose désormais dans le choix du matériau. On essaie de rectifier l'abus de dépense d'énergie non seulement en agissant sur la consommation mais en gardant l'équilibre dans l'écobilan dès le processus de fabrication. Dans notre cas, les fibres naturelles se démarquent des autres types de fibres puisqu'elles se dégradent naturellement dans l'environnement ce qui minimise l'impact environnemental sur la planète. En plus, la production de telles fibres nécessite moins d'énergie. L'utilisation des fibres naturelles réduit considérablement la masse des composites d'où l'économie d'énergie. Outre cela, le critère naturel de ce genre de fibres maintient un taux de CO_2 neutre. Une étude présentant l'analyse de cycle de vie de palettes de transport en PP renforcé de fibre de verre (GFR) et en PP renforcé de fibre de roseau de Chine (NFR) présente une comparaison des performances environnementales selon le modèle CML 92 [9]. Le tableau 4 résume certains résultats comparatifs de l'étude. Il montre que les impacts environnementaux de la palette de NFR sont considérablement inférieurs à ceux d'une palette GFR.

Tableau 4 : Comparatif des impacts environnementaux du cycle de vie des palettes de transport en PP renforcées de fibre de verre et en roseau de Chine [10].

Impacts environnementaux	Palette en fibre de verre	Palette de fibre de roseau de Chine
Utilisation d'énergie non-renouvelable (MJ)	1400	717
Emission de CO_2 (Kg)	73.1	42
Emission de CO (g)	74.1	54.6
Emission de NO_x (g)	513	349
Emission de SO_x (g)	389	163
CML- toxicité humaine (kg 1.4 DCB éq.)	21.2	9.04
CML- effet de serre (kg CO_2 éq.)	75.3	40.4

NB : L'unité utilisée pour caractériser la toxicité humaine est le kilogramme d'équivalent dichlorobenzène (kg 1,4 DCB éq.).

L'unité utilisée pour caractériser l'effet de serre est le kilogramme d'équivalent dioxyde de carbone (kg CO_2 éq.).

1.1.4 Utilité des composites de fibres naturelles :

La conscience environnementale et l'intérêt communautaire sont en augmentation continue surtout durant les dernières années. Les nouvelles réglementations environnementales et la consommation superflue de pétrole ont conduit à penser à l'utilisation de matériaux inépuisables, n'ayant pas un impact environnemental important. Dans ce cadre, la fibre naturelle est considérée comme l'un des matériaux respectueux de l'environnement et qui ont de bonnes propriétés par rapport à la fibre synthétique [11]. C'est pour cela que l'intérêt pour

l'industrie des NFPC connaît une croissance rapide et continue partout dans le monde. Une récente étude a montré que le secteur industriel mondial des composites à base de polymères renforcés de fibres naturelles a atteint 2.1 milliards de dollars en 2010. Selon les indications actuelles, l'intérêt pour l'industrie des NFPC est en croissance rapide et continue partout dans le monde. Au cours des dernières années, le recours aux NFPC s'est considérablement élargi et a touché les marchandises destinées aux consommateurs. D'après la même source, les statistiques, sur une période de 5 ans : entre 2010 et 2016, l'industrie des NFPC a connu une croissance de plus que 10% dans le monde.

Plusieurs types de fibres naturelles tels que le jute, le chanvre, le kénaf, le palmier à huile et le bambou se sont distingués par leurs grande importance dans différentes applications automobiles, composants structurels, emballages et construction [12]. Les NFPC se manifestent aussi dans les industries électriques et électroniques, l'aérospatiale, les sports, les produits bureautiques et ainsi de suite. L'application des NFPC est généralisée grâce à leur faible poids spécifique, leur faible coût de production, leur résistance à la corrosion et à la fatigue, la biodégradabilité totale des fibres, l'amélioration du fini de surface des composites moulés par rapport aux fibres synthétiques [13-25].

En particulier, l'industrie automobile donne une longue liste des avantages présumés des composites de fibres naturelles comme :

- Faible densité : ce qui peut entraîner une réduction de poids de 10 à 30%.
- Propriétés mécaniques acceptables, bonnes propriétés acoustiques.
- Propriétés de traitement favorables, par exemple faible usure des outils.
- Options pour de nouvelles technologies et matériaux de production.
- Performance d'accident favorable, grande stabilité, moins d'éclats.
- Ecobilan favorable pour la production de pièces.

- Ecobilan favorable pendant le fonctionnement du véhicule grâce aux économies de poids.
- Avantages pour la santé au travail par rapport aux fibres de verre pendant la production.
- Pas de dégazage de composés toxiques (contrairement au bois lié à la résine phénolique et aux parties en fibres de coton recyclées).

Le tableau 5 énumère les applications des NFPC chez plusieurs manufacturiers automobiles :

Tableau 5 : Les applications des NFPC dans l'industrie automobile [10, 26, 27].

Manufacturier	Modèle	Application
Rover	2000 et autre	Étagère de rangement arrière / panneau, et isolations
Opel	Vectra, Astra, Zafira	Panneaux de porte, panneau de couvercle de colonne, panneau de garniture de pavillon et tableau de bord
Volkswagen	Passat, Golf, Bora	Dossier de siège, panneau de porte, panneau de finition de couvercle de coffre et doublure de coffre
Audi	A2, A3, A4, A6, A8, Roadster, Coupe	Doublure de coffre, doublure de roue de secours, panneau de porte latérale et arrière, dossier de siège et porte-chapeaux
Mercedes Benz	C,S,E, A class	Panneaux de porte (lin / sisal / fibres de bois avec résine époxy / matrice UP), boîte à gants (fibres de coton / bois moulé, lin / sisal), support de tableau de bord, isolation (fibre de coton), baguettes / moulures fibre de coton, panneau de coffre (coton avec fibres PP / PET) et surface / dossier de siège (fibre de coco / caoutchouc naturel)
General Motors	Cadillac de Ville, Chevrolet Trail Blazer	Dossier, tapis de coffre
Ford	Mondeo CD162, Focus	Panneaux de plancher, inserts de porte, panneaux de porte, B-piliers et doublure de coffre

Au fil des années, l'exploitation des fibres naturelles par les industries automobiles dans le monde connaît une hausse remarquable spécialement chez les producteurs allemands [28]. Le tableau 6 donne une petite idée sur les quantités demandées par les fabricants de véhicules allemands durant les années passées.

Tableau 6 : Evolution de la demande en fibres naturelles exprimées en tonne dans le marché automobile allemand [29, 30].

Fibre (tonnes)	1996	1999	2000	2001	2002	2003
Lin	2000	7000	9000	8500	9000	9400
Chanvre	0	300	1200	1600	2200	2300
Fibre exotiques (jute, kenaf, sisal, coco, abaca)	2000	2300	2000	5000	6000	6300
Total	4000	9600	12200	15100	17200	18000

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 pose des problèmes durables par suite de l'épuisement des ressources pétrolières non renouvelables et de la pollution engendrée.

L'alternative proposée dans ce projet consiste à utiliser un biocomposite ou un nano composite réalisé avec un thermoplastique d'origine bio ou non mélangé à des fibres naturelles d'origine papetière : bouleau pour élaborer des engrenages.

L'influence des performances de tribologie (l'usure et le frottement) sur les engrenages en fonctionnement n'est pas encore élucidée et ce projet de maîtrise se propose de l'étudier.

1.3 Questions de recherche :

Quelles sont les performances de tribologie d'un engrenage en composite à matrice polymérique à fibres de bouleau ?

Quelle est l'influence des paramètres de fonctionnement tels que la vitesse, la charge, le matériau, la température, etc. sur les performances de tribologie de l'engrenage ?

1.4 Objectif du travail :

Pour ce travail, on va utiliser le bouleau comme source de fibres naturelles (birch fiber) et une matrice de polyéthylène de haute densité (HDPE). Pour traiter la fibre et améliorer la cohésion fibre-matrice, on a sélectionné un agent de couplage appelé polyéthylène maléaté (MAPE).

Ce projet vise à :

- Réaliser une étude expérimentale analytique de tribologie en roulement/glissement combiné sur des éprouvettes de composite à fibres naturelles (CFN).
- L'étude de l'influence de la valeur des paramètres de fonctionnement tels que la vitesse, la charge, le matériau, la température, etc... sur le comportement en tribologie : frottement et usure,
- La transposition des résultats au cas des engrenages

1.5 Contenu du mémoire :

Tout d'abord, le premier chapitre introduit le sujet du mémoire et parle d'une façon générale sur les avantages ainsi que l'utilité de l'utilisation des NFPC. Par la suite, le chapitre suivant consiste en une revue de littérature sur les performances de tribologie des composites à

fibres naturelles en général et l'effet des paramètres de fonctionnement sur la tribologie des NFPC dans l'application des engrenages. La méthodologie expérimentale sera expliquée au troisième chapitre. Dans cette section, on va présenter le protocole expérimental utilisé, les hypothèses mises en évidence, les conditions opératoires ainsi que le plan expérimental suivi. Finalement, les résultats expérimentaux seront présentés dans le dernier chapitre accompagnés d'une brève discussion puis une conclusion.

CHAPITRE 2 – RECENSION DES ÉCRITS ET CADRE THÉORIQUE

2.1 Préambules :

Nombreuses sont les études qui ont traité les composites à fibres naturelles. Mais jusqu'à présent, la littérature ne dit presque rien à propos du comportement de tribologie des composites en polyéthylène à fibre de bouleau, d'où l'originalité et l'importance de cette étude. C'est pour cela que dans ce chapitre, on va établir d'une façon générale les effets des paramètres de fonctionnement sur les performances de tribologie pour plusieurs composites en polymères avec des fibres naturelles. Par la suite, on va introduire l'approche bibliographique du protocole expérimental communément utilisé pour ce genre de tests.

2.2 Références scientifiques :

2.2.1 Généralités sur le comportement de tribologie des composites en polymère à fibres naturelles :

Dans ce paragraphe, on va montrer l'effet des fibres naturelles sur les propriétés de tribologie des composites renforcés de fibres naturelles ainsi que les paramètres principaux responsables de l'usure excessive et du frottement, tels que le traitement des fibres, la fraction massique et les paramètres d'essai, comme la température, la charge appliquée et la vitesse.

- **Canne à sucre :**

El-Tayeb et al. (2018) ont étudié le taux d'usure et le coefficient de frottement du polyester renforcé de fibres de cannes à sucre (SCRP) et comparé les résultats avec des composites de polyester renforcé de fibre de verre (GRP). Pour un composite de SCRП d'une longueur de fibre de 5 mm testé à une vitesse de glissement de 2.5 m/s soit une distance de glissement de 2.25 km, la résistance à l'usure atteinte à une charge de 40 N est de l'ordre de 3.8

$E+07 \text{ Nm/m}^3$. Elle augmente avec la charge pour atteindre une valeur de $10 E+07 \text{ Nm/m}^3$ à une charge de 80 N. En contrepartie, la résistance à l'usure diminue de $1.3 E+07 \text{ Nm/m}^3$ à 40 N à $0.6 E+07 \text{ Nm/m}^3$ à 80 N pour un composite de GRP sollicité aux mêmes conditions d'essai. Par ailleurs, les valeurs du coefficient de frottement demeurent relativement faibles et comparables pour les deux composites. On parle d'une valeur de 0.015 pour le SCRP et 0.013 pour le CGRP pour une charge de 80 N. Ainsi, la fibre de canne à sucre présente un fort potentiel de renforcement du polyester et s'est révélée être un produit très compétitif par rapport à la fibre de verre [31].

La variation du taux d'usure et du coefficient de frottement des deux types de composite à une charge de 40 N est illustrée à la figure 3. Les résultats des tests montrent que le SCRP est un composite prometteur et compétitif au GRP.

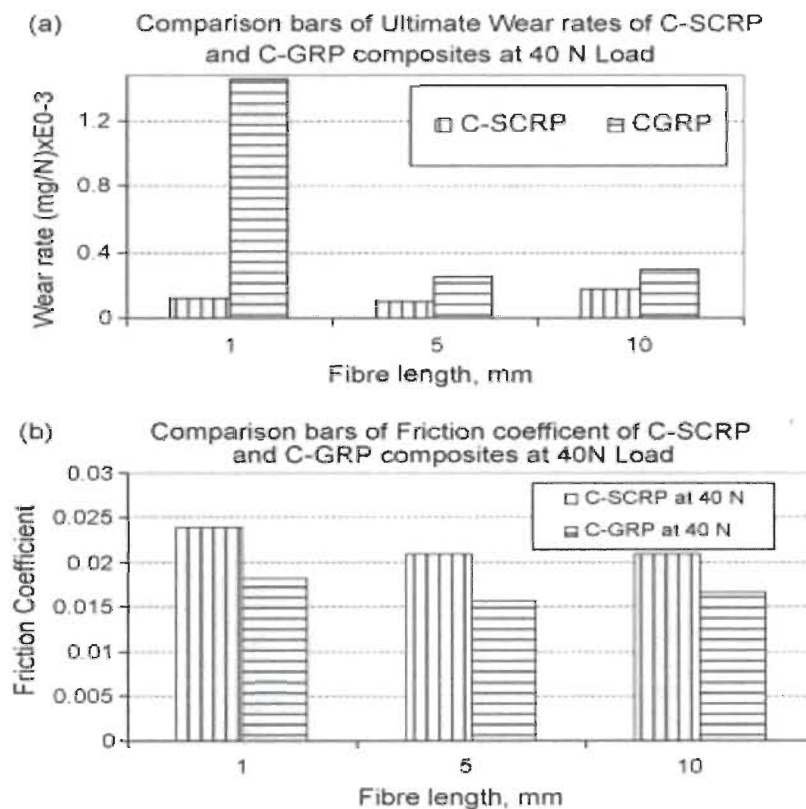


Figure 3 : Comparatif du taux d'usure et du coefficient de frottement des composites respectifs C-SCRP et C-GRP [31].

- **Jute**

Le jute est produit à partir de plantes du genre *Corchorus*, qui comprend environ 100 espèces. Cette plante est cultivée pour ses fibres qui sont connues comme les moins chères. Elles sont aussi considérées comme les meilleures fibres avec le volume de production le plus élevé. Il est l'un des matériaux les plus utiles disponibles dans le commerce grâce à sa grande capacité de moulage. Les propriétés de tribologie du composite polypropylène renforcé de fibres de jute ou non ont été étudiées par Yallew et al.(2014) [32]. La variation du coefficient de frottement et du taux d'usure en fonction de la charge appliquée à différentes vitesses de glissement montrent des performances compétitives du composite PP/Jute (voir figure 4) par rapport aux matériaux conventionnels. Ce composite est maintenant largement utilisé dans les applications de roulements [30, 33-35].

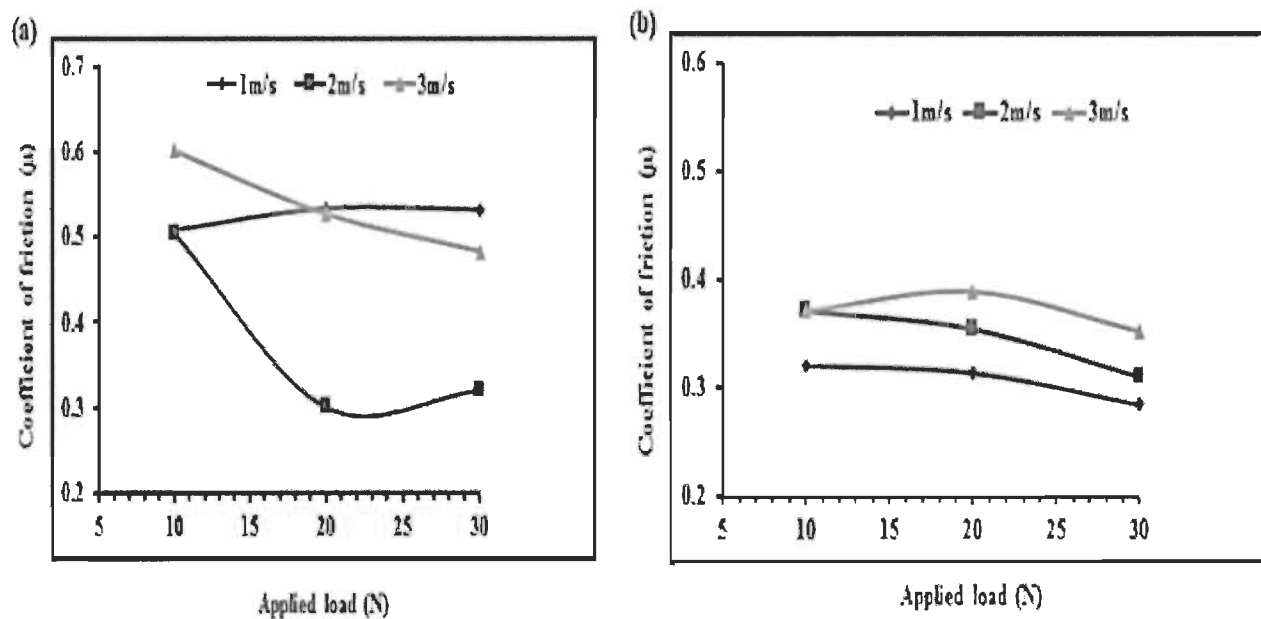


Figure 4 : Comparatif du coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée entre a) PP net ; b) Jute/PP [32].

- **Fibre de coton :**

Eleiche et al. (1986) ont étudié les performances de tribologie du composite de polyester renforcé par des fibres de coton. Ce type de renfort présente un bon coefficient de frottement et un bas taux d'usure surtout à des fractions volumiques élevées de fibres comme le montre la figure 5. Ce type de composites est également utilisé dans les applications de roulements [11, 36-38].

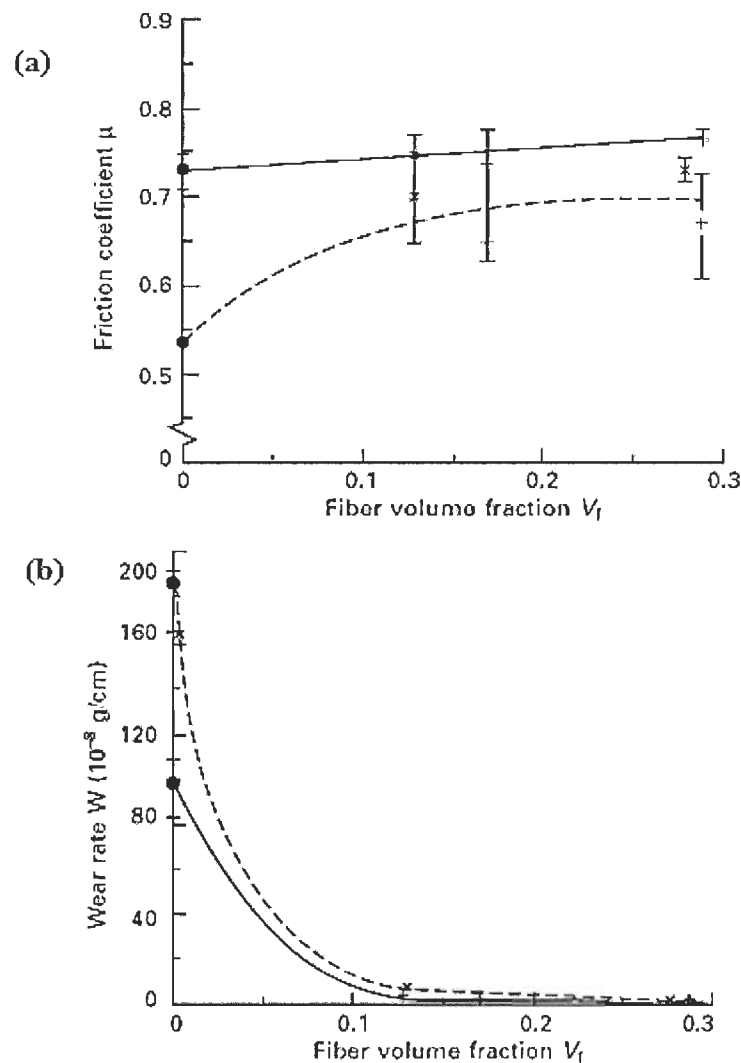


Figure 5 : Coefficient de frottement (a) et taux d'usure (b) du composite :polyester/fibres de coton en fonction du taux volumique de fibres à deux vitesses de glissement : (- - -) 32 m/s ; (—) 10 m/s.

2.2.2 Effet de la charge appliquée sur le comportement de tribologie des NFPC :

Vijaya et al. (2014) ont évalué les propriétés de tribologie du composite de polypropylène renforcé par des fibres de jute sur un test de glissement à sec à l'aide d'un dispositif de « pin on disc ». Le coefficient de frottement du composite entre le disque tournant et l'éprouvette stationnaire à différentes charges et à une vitesse de glissement de 50 cm/s est visualisé à des fractions volumiques allant de 0 à 15% dans la figure 6 :

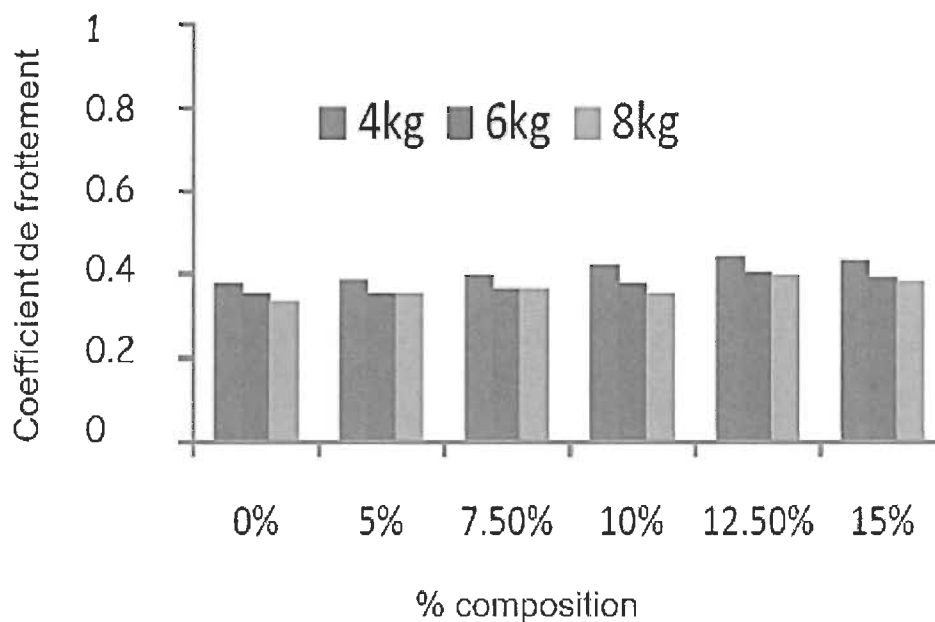


Figure 6 : Coefficient de frottement à différentes charges et à une vitesse de glissement de 50 cm/s [39].

Quelle que soit la teneur en fibres utilisée, la charge a un effet direct sur le coefficient de frottement. Le coefficient de frottement est inversement proportionnel à la charge [21, 40-42]. D'autre part, Omrani et al (2015) ont étudié les performances de tribologie du même type de composite sur des échantillons d'une teneur en fibres de 40% en utilisant un dispositif « pin-on-disc » sur une distance de 3000 m. Les expériences ont été réalisées deux fois selon la norme ASTM G-99-55. Les courbes décrivant le coefficient de frottement en fonction de la charge à

différentes vitesses de glissement (1, 2 et 3 m/s) sont illustrées à la figure 7. Les résultats trouvés appuient ceux de l'étude mentionnée auparavant.

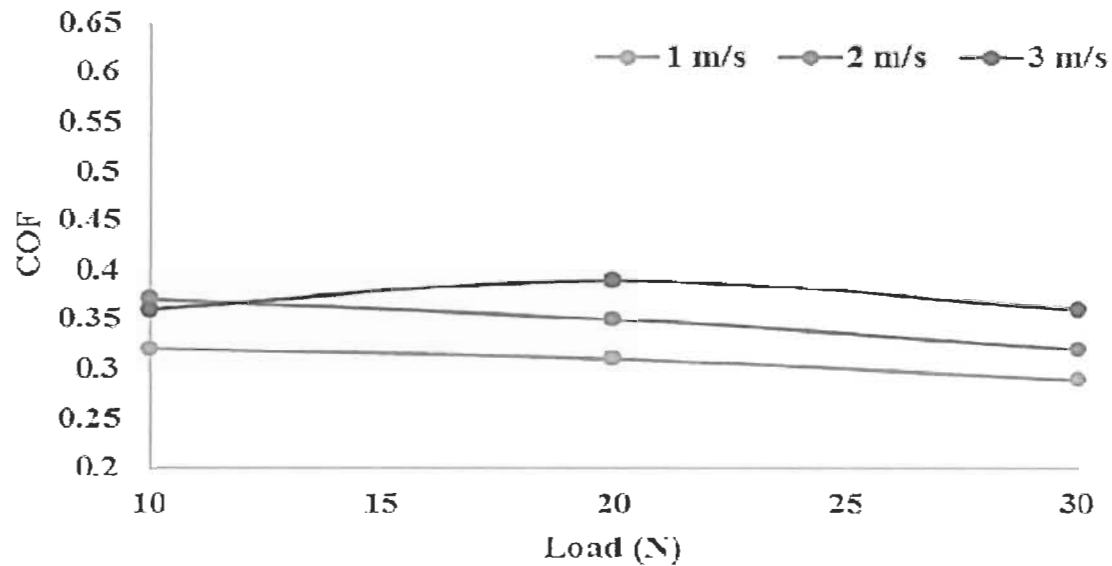


Figure 7 : Coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée pour jute/PP.

Par ailleurs, l'effet de la charge appliquée (10, 20 et 30 N) sur le taux d'usure pour trois vitesses différentes est montré dans la figure 8. Le taux d'usure est exprimé en unité de volume usée (mm^3) par unité de charge appliquée (N) et unité de distance parcourue (m).

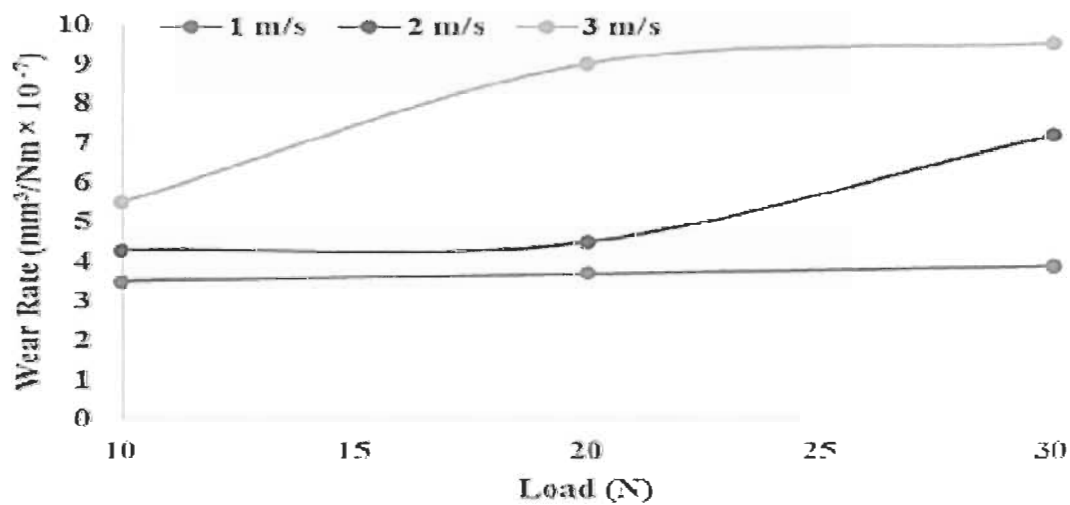


Figure 8 : Variation du taux d'usure en fonction de la charge appliquée pour jute/PP.

D'une façon générale, à mesure que la charge augmente, le taux d'usure augmente et le coefficient de frottement diminue [32].

Chand et Dwivedi (2012) ont étudié les caractéristiques de frottement et d'usure des composites de polyester renforcés de fibres de sisal. La figure 9 décrivant la perte de masse montre qu'en augmentant la charge, l'usure augmente quel que soit la modification apportée sur le composite [43, 44].

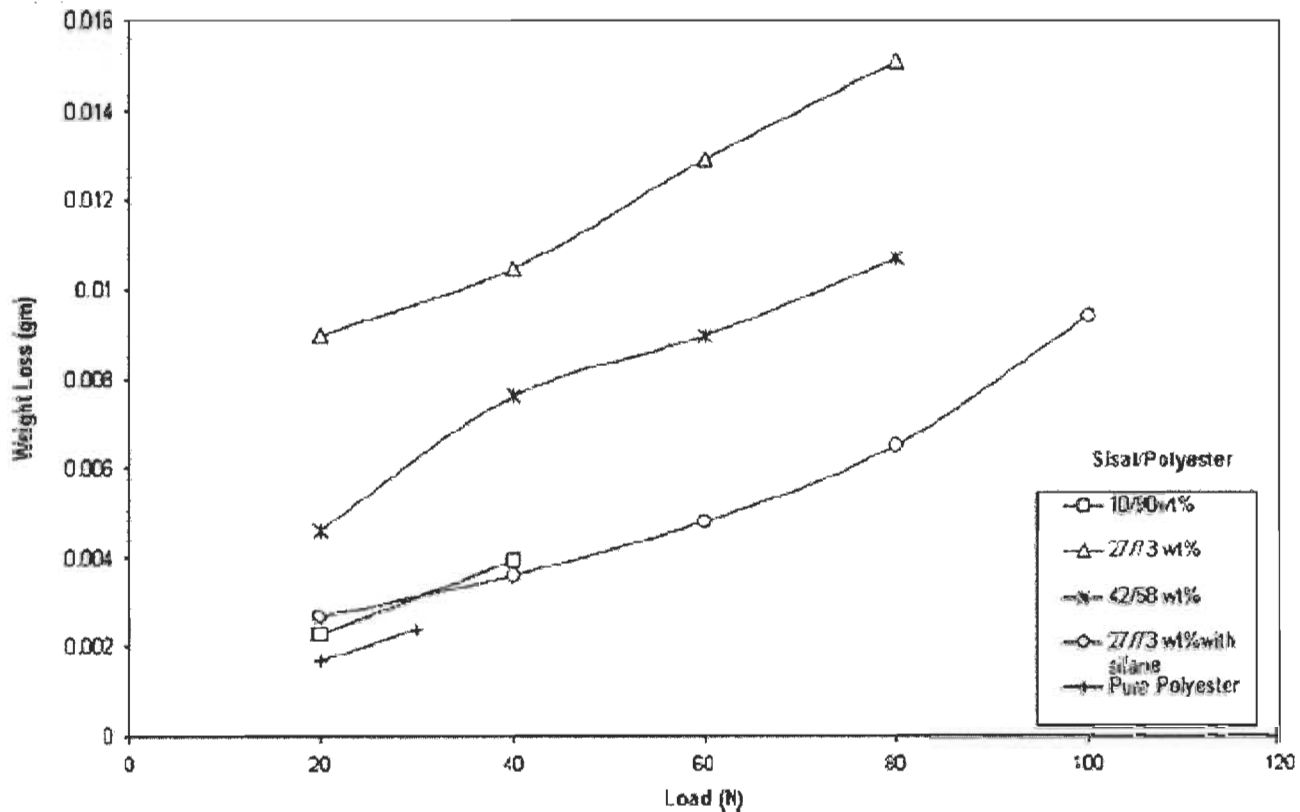


Figure 9 : Perte de masse en fonction de la charge appliquée à différentes combinaisons de pourcentage volumique d'un composite de polyester renforcé par des fibres de sisal.

En conclusion, la fraction volumique des fibres dans le composite et la charge appliquée ont un effet considérable sur le taux d'usure. Par ailleurs, la variation du coefficient de frottement est minime par rapport à ces deux facteurs. Généralement, l'augmentation de la charge et de la teneur des fibres fait baisser le coefficient de frottement.

2.2.3 Effet de l'agent de couplage sur le comportement de tribologie des composites polymère-fibres naturelles :

Afin de résoudre le problème d'incompatibilité entre les fibres naturelles et la matrice HDPE, il est très souvent nécessaire d'appliquer un revêtement de MAPE sur la surface des fibres. En effet, les impuretés toujours présentes à la surface des fibres naturelles et leur nature hydrophile conduisent à une médiocrité dans les propriétés du composite résultant [45].

Il existe plusieurs autres méthodes de modification de l'état de l'adhésion entre les fibres et la matrice comme l'usage des agents de couplage organiques, les anhydrides tels que l'anhydride maléique, l'anhydride acétique, l'anhydride succinique et l'anhydride phthalique. Aussi, la littérature propose des traitements à la soude avec une silanisation ou une acétylation [46-48].

Grâce à la structure atomique de l'anhydride maléique (la double liaison ($-C = C-$) et les deux groupements carboxylates ($-COO-$), une réaction chimique se produit pour créer une forte adhésion à l'interface matrice/fibre (voir figure 10).

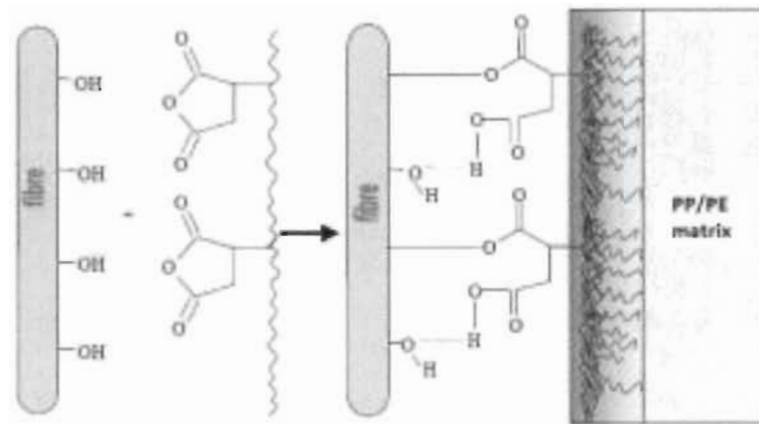


Figure 10 : Interaction de la cellulose envers le polyéthylène maléaté [49].

Ainsi, l'utilisation de polymères maléates contribue à la dispersion des fibres dans le polymère et améliore ses propriétés mécaniques, par création de liaisons entre les hydroxyles des fibres cellulosiques et les carbonyles des maléates intégrés à la matrice.

Une étude s'intéressant aux propriétés mécaniques et thermiques dynamiques des composites de jute/ HDPE traités avec MAPE rapporte que la température du premier processus de dégradation pour le composite traité avec MAPE était plus élevée que celle des composites sans agent de couplage et le pourcentage de perte de poids par usure durant les processus de dégradation était également plus faible que dans les composites non traités, ce qui prouve que l'ajout de MAPE dans les composites assure une meilleure stabilité thermique d'où une meilleure performance de tribologie [50].

Chand et al. (2006) ont étudié l'effet de l'agent de couplage sur le comportement de tribologie des composites de polypropylène renforcés de fibres de jute. La figure 11 montre la variation du taux d'usure avec la charge pour les composites renforcés de fibres de jute non traités (UT), des composites de PP renforcés de fibres de jute traités à la solution MA-g-PP (CT) et des composites PP renforcés de fibres de jute mélangés à la fusion (MA-g-PP) (MT). L'utilisation d'un agent de couplage donne une meilleure résistance à l'usure comparée au composite non traité [20, 43, 50].

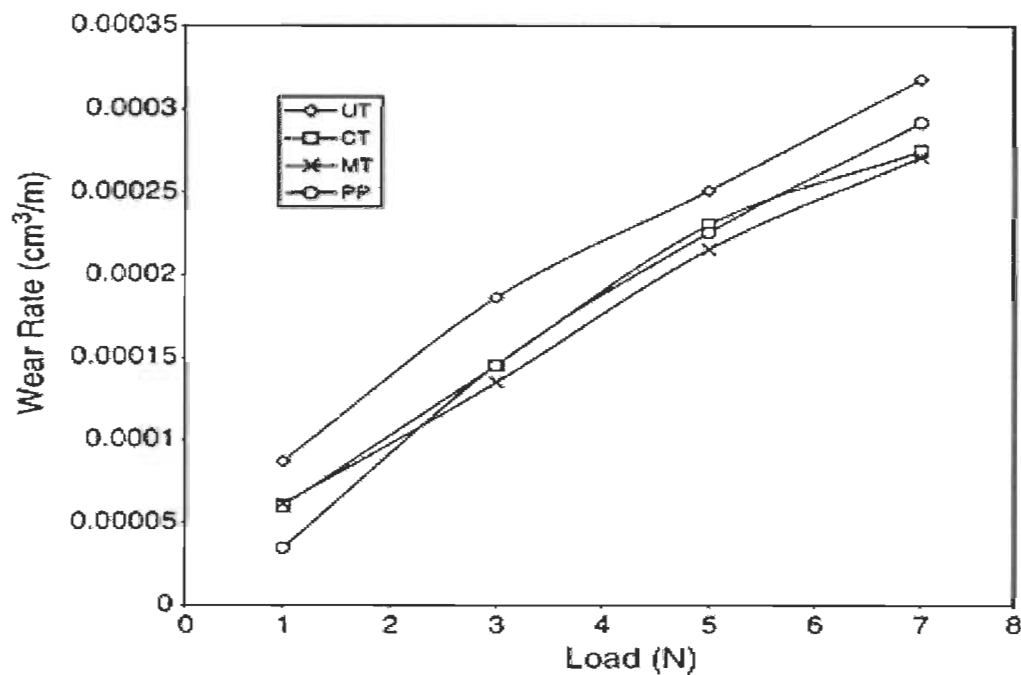


Figure 11 :Variation du taux d'usure avec la charge pour les composites renforcés de fibres de jute non-traité (UT), les composites de PP renforcés de jute traité avec la solution MA-g-PP (CT) et les composites de PP renforcé de fibre de jutes avec MA-g-PP mélangé à la fusion (MT).

Yousif et al. (2008) ont étudié les conséquences du traitement alcalin (6% NaOH) sur les performances de tribologie des composites polyester renforcés de fibres de palmier à huile traitées et non traitées (T-OPRP et UT-OPRP) en utilisant le dispositif de « Block-on-ring » (BOR) suivant la norme ASTM G 137-95. L'expérience consiste à appliquer une charge normale sur un échantillon en friction contre un anneau tournant. Les composites T-OPRP et UT-OPRP ont été observés à différentes distances de glissement (0,85–5 km), à des vitesses de glissement (1,7–3,9 m / s) et à des charges appliquées (30–100 N) dans des conditions de contact sec. En général, la présence de fibres de palmier à huile non traitées et traitées dans la matrice de polyester favorise les performances de tribologie par rapport au polyester vierge (NP). Le taux d'usure et le coefficient de frottement sont améliorés respectivement d'environ 40 à 80%

et de 40 à 70% (voir figures 12 et 13). Le polyester vierge (NP) a donné des résultats médiocres en raison de la rapidité des débris de polyester qui se sont détachés de l'interface, en particulier pour les longues distances de glissement, la charge élevée et la vitesse de glissement. Le T-OPRP présentait un taux d'usure spécifique inférieur d'environ 11% par rapport à l'UT-OPRP en raison de l'amélioration des caractéristiques d'adhérence entre les fibres de palmier à huile et la matrice de polyester.

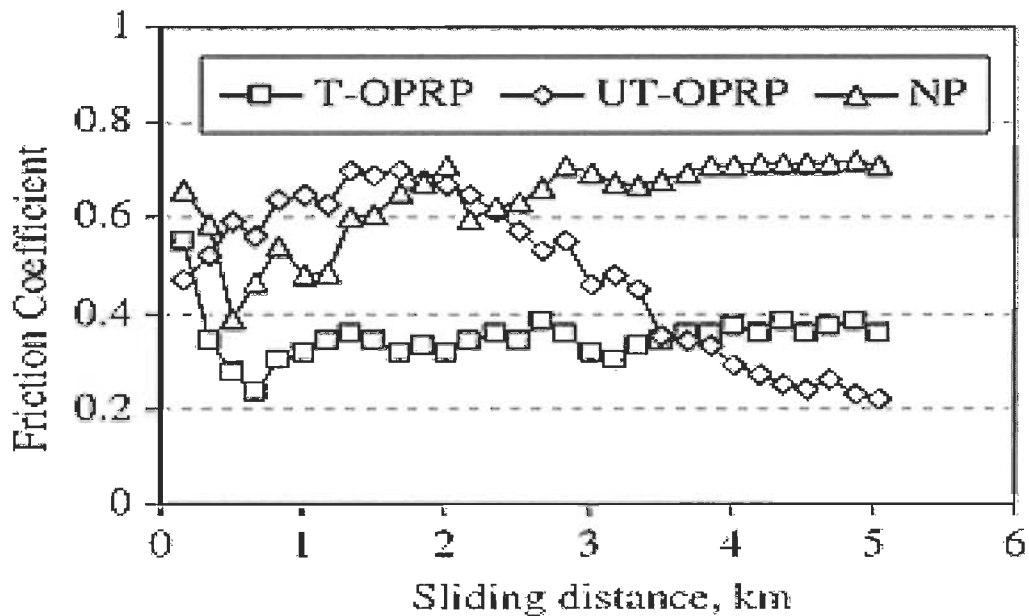


Figure 12 : Coefficient de frottement par rapport à la distance de glissement du NP et des composites T-OPRP et UT-OPRP, pour une charge appliquée de 50 N et une vitesse de glissement de 2,8 m/s [51].

Voici les caractéristiques du taux d'usure spécifique en fonction de la distance de glissement :

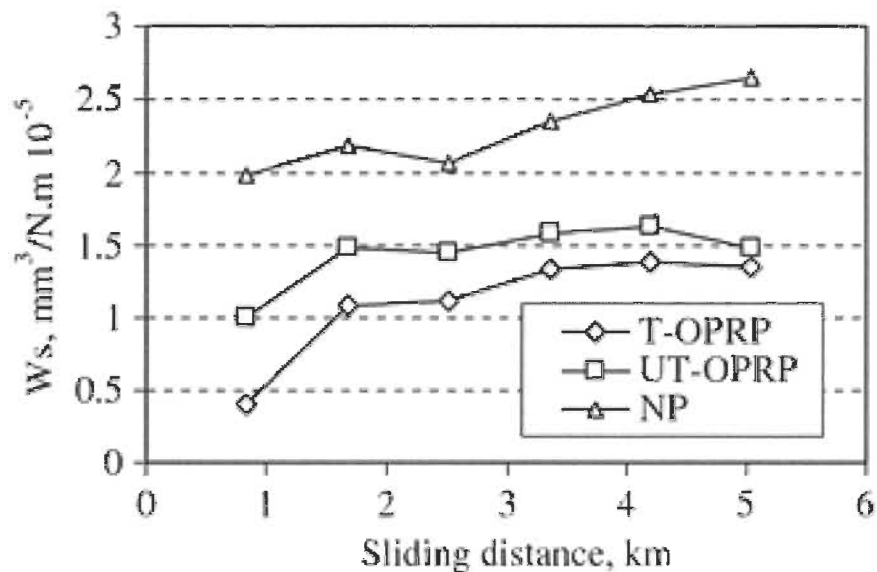


Figure 13 : Taux d'usure spécifique en fonction de la distance de glissement du NP et des composites T-OPRP et UT-OPRP, pour une charge appliquée de 50 N et une vitesse de glissement de 2,8 m / s [51].

De plus, l'observation au MEB de la surface usée du composite UT-OPRP a montré un décollement et une flexion des fibres, ainsi que la fragmentation et la déformation des régions résineuses. Par contre, le composite T-OPRP présentait moins de dommages par rapport à UT-OPRP, où aucun signe de décollement des fibres n'avait été observé. Le coefficient de frottement du composite T-OPRP semble être stable par rapport à l'UT-OPRP qui avait montré un comportement fluctuant pendant le processus de frottement [51].

N. Singh Gill et al. (2009) ont étudié le comportement à l'usure des fibres de béton non traitées et traitées comme renfort dans les composites polyester (BFRP) dans les mêmes conditions (charge appliquée = 30 N, vitesse de glissement : 2,8 m / s et contact sec). La comparaison a révélé que la résistance à l'usure augmentait considérablement lorsque les fibres de béton étaient traitées avec 6% de NaOH. En général, le taux d'usure spécifique (voir équation 3.1) était de l'ordre de 10^{-8} pour les fibres de béton traitées et de 10^{-5} pour les fibres de béton non traitées. Ceci est dû à la forte adhérence des fibres de noix de béton avec la matrice de

polyester empêchant le retrait des fibres pendant le glissement, c'est-à-dire un faible retrait du matériau [52, 53].

2.2.4 Effet du pourcentage volumique en fibres sur le comportement des composites polymère-fibres naturelles :

Plusieurs articles ont parlé de l'effet de la fraction volumique des fibres sur le comportement mécanique des composites. En étudiant les composites HDPE-fibres de jute, Mohanty et al. (2006) montrent que les propriétés mécaniques des composites jute-HDPE non traités augmentent linéairement avec l'augmentation de la teneur en fibre de 0% à 30 %. Les résistances à la traction et à la flexion ont augmenté d'environ 31%, 45% et 57%, respectivement [30, 35, 50]. Le tableau 7 montre le rôle que joue la teneur en fibres sur la résistance mécanique.

Tableau 7 : Effet de la teneur en fibres sur le comportement mécanique du composite [54].

Fibre (wt%)	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à l'impact (J/m)
0	20.82	24.07	32.57
10	23.47	26.34	40.82
15	25.68	29.17	46.73
30	27.24	34.83	51.28
45	22	27.72	45.8

D'après le tableau précédent, on remarque des caractéristiques mécaniques optimales des composites avec une teneur de fibres de 30% et une diminution prononcée de la résistance mécanique des composites à une teneur de fibres de 45%. Ceci prouve que les performances

mécaniques atteignent l'optimum à une teneur de fibres situé entre ces deux valeurs. La diminution des propriétés mécaniques à forte charge de fibre implique une mauvaise adhérence fibre-matrice qui favorise la formation de microfissures à l'interface ainsi qu'un transfert saccadé de contrainte.

L'effet de la concentration en fibre dans les NFPC a été démontré aussi dans une étude qu'a fait Fayçal Mijiyawa et al. (2015) sur les composites en polypropylène renforcés par des fibres de bouleau en présence et en absence de l'agent de couplage. Il a réussi ainsi à comparer les modules élastiques et la résistance à la rupture des composites de teneurs en fibres différentes [8, 55]. Les résultats sont présentés sous forme de graphe sur la figure 14 :

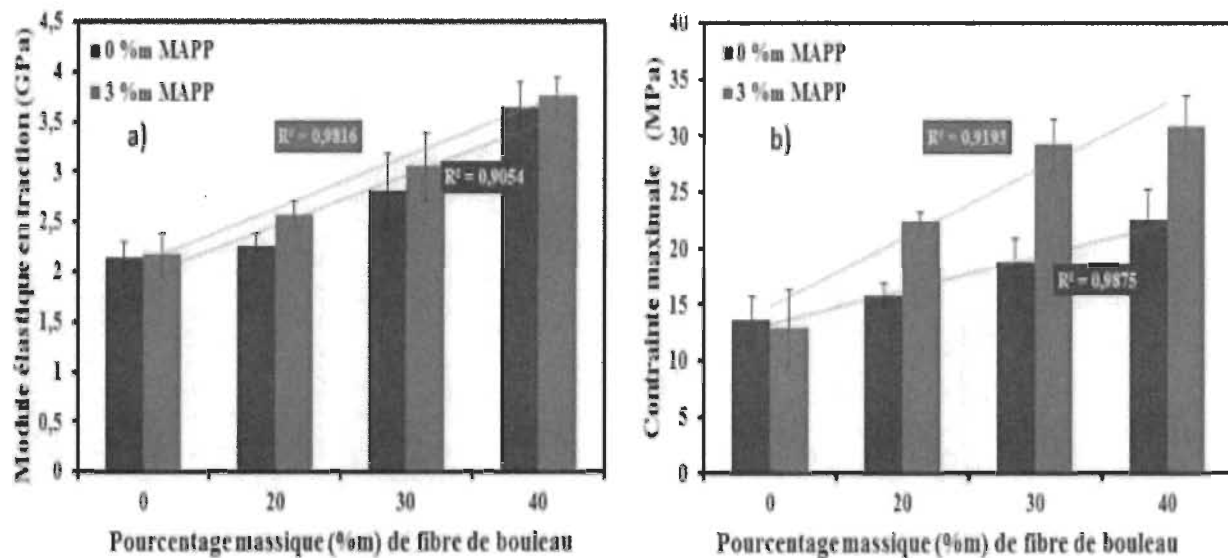


Figure 14 : Effet du pourcentage volumique de fibre et de l'agent de couplage sur le comportement mécanique du composite PP/ bouleau.

2.2.5 Influence de l'humidité sur les propriétés des NFPC :

Il est important de montrer le rôle crucial que joue l'humidité dans la durée de vie des composites NFPC par l'intermédiaire du renfort. En effet, les fibres naturelles sont

hygroscopiques. Cette capacité à absorber l'humidité affecte les caractéristiques mécaniques et de tribologie des composites. Le comportement de la fibre sous l'action conjuguée de la température, de l'eau et d'une charge mécanique est appelé comportement thermo-hygro-mécanique (THM) ou thermo-hydro-viscoélastique. L'étude des propriétés THM des fibres naturelles est très importante parce que leur dégradation hygrothermique sous l'influence de la température et de l'humidité va détruire et dégrader les propriétés mécaniques et de tribologie, elle peut aussi changer la dimension du composite. Les études ont montré que le renfort est principalement responsable du gonflement, de la résistance à l'eau ou au feu. Ainsi, l'absorption d'eau peut affecter l'échantillon étudié à la fois en dimensions et en poids. Pour l'ingénierie, ce changement est si minime que plusieurs auteurs l'ont carrément négligé. Toutefois, le changement de dimension ou de poids de l'échantillon peut avoir des effets importants sur le mesurage de l'usure soit par déplacement ou par pesée. Il doit donc être examiné attentivement [11, 56-60].

2.2.6 Influence de la température sur les performances de tribologie

La température joue un rôle crucial dans le processus de fonctionnement des composants de machinerie, ainsi sur leur durée de vie et leur comportement de tribologie dépendamment du matériau en œuvre. Il est évident que ces composants comme les engrenages, les paliers et les arbres fabriqués à base de polymère se comportent différemment que ceux fabriqués en métaux surtout durant le fonctionnement puisqu'on parle de deux paliers de propriétés thermomécaniques différents. Ainsi, la température influence directement l'endommagement des composantes en plastiques. Dans le cas des plastiques, on parle toujours de température limite appelée T_g ou encore « température de transition vitreuse ». Cette température limite considérablement la marge d'utilisation des matériaux en plastiques dans plusieurs applications

car pour les polymères en général, elle demeure très basse comparée à celle des métaux. Plus encore, les problèmes d'échauffement s'aggravent davantage lors de l'utilisation des matériaux plastiques dans des applications dépourvues de lubrifications [23, 48, 61-63].

L'usure et le frottement des polymères sont affectés par les variations de la température de surface. On sait depuis longtemps que la température de surface de glissement a une forte influence sur l'usure et le frottement des polymères [64-66]. Bien qu'il soit généralement admis que l'usure augmente avec la température de surface [64, 65], la relation entre température et usure n'est pas simple à déterminer. Elle dépend également des paramètres de fonctionnement tels que la vitesse de glissement, la pression de contact et les matériaux eux-mêmes [67-69]. Lancaster et al. (1971) ont montré que certains polymères présentaient un taux d'usure minimal à une certaine température de surface. Ils ont constaté que le taux d'usure de nombreux polymères augmente de manière significative lorsque la température de la surface du polymère dépasse un seuil critique.

Plusieurs auteurs ont parlé du comportement thermomécanique des thermoplastiques élaborés dans des applications comme les engrenages. Ils ont affirmé que l'élévation de la température des engrenages en plastique roulant contre eux-mêmes contribue majoritairement à l'usure des dents et mène à l'endommagement précoce surtout sous l'effet de grandes charges. S.Senthilvelan et al (2006) ont montré que le renforcement des engrenages en nylon 6/6 par des fibres de verre et de carbone réduit la capacité de génération de chaleur interne dans la matrice polymère pendant le chargement cyclique [70, 71] (voir figure 15).

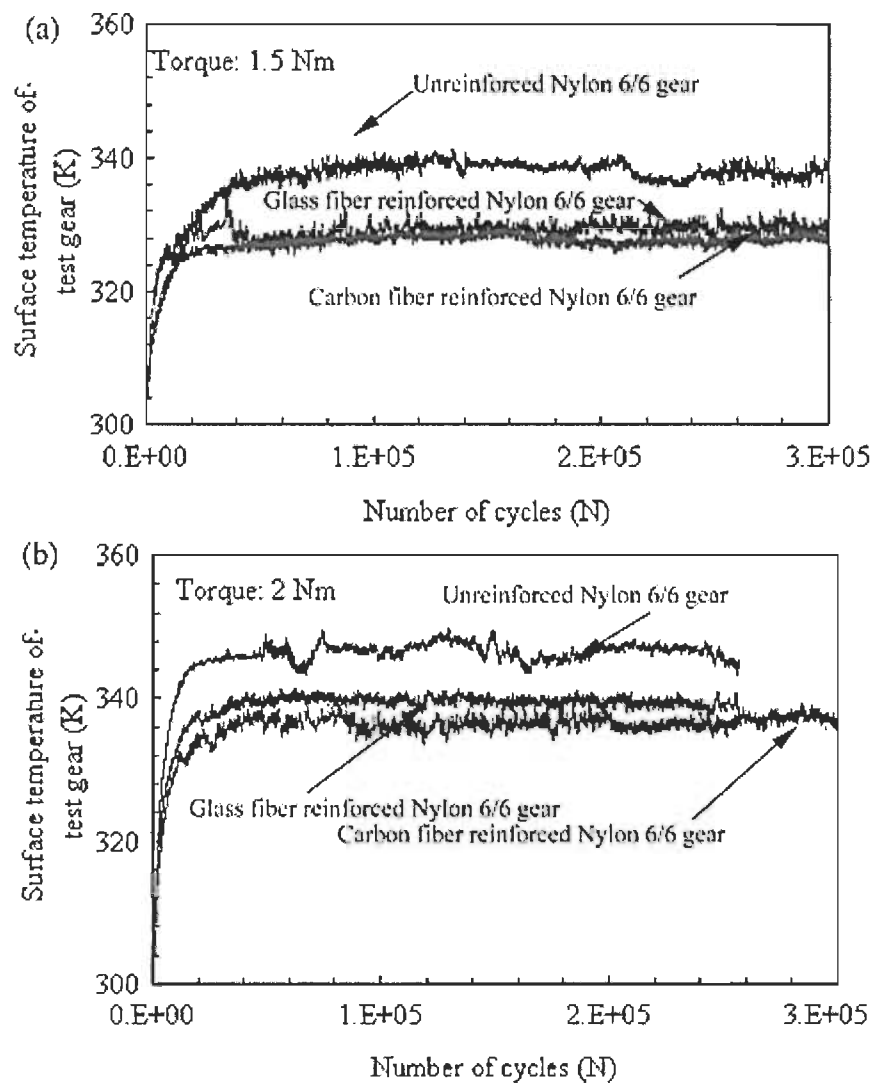


Figure 15 : Température de surface mesurée des engrenages de nylon renforcé et non renforcé à (a) 1,5 Nm et (b) 2 Nm [70, 71].

Mao et al. (2007) ont créé une relation logique entre la température et l'usure des engrenages en plastique. Ils révèlent que durant le fonctionnement, la température peut atteindre la température de fusion du matériau ce qui mène à la détérioration accélérée du matériau [72, 73].

Théoriquement, la température prédite générée à l'interface entre les deux engrenages en contact peut être modélisée comme la somme des températures dominantes à ce point décrites dans l'équation 2.1 :

$$T_{interface} = T_{flash} + T_{bulk} \quad (2.1)$$

T_{flash} est la température instantanée due au chauffage par frottement, et T_{bulk} est la valeur de la température en tout point de la dent, tant dans le corps que sur la surface et dans les trois dimensions [74].

Conformément à une observation courante dans les essais à double disques comme dans les essais d'engrenages, Hoskins et al. (2014) ont montré, comme dans la figure 16, qu'il y a trois zones d'usure distinctes pouvant être corrélées à la fois aux profils de température et de frottement : une première zone appelée « période de rodage » durant laquelle les trois paramètres contrôlés sont en augmentation significative, suivie d'une zone intermédiaire où les pentes des trois courbes diminuent pour faire une sorte de palier. Elle est appelée « période de fonctionnement stable ». Finalement une troisième zone décrite par une augmentation de la force de frottement et de l'usure appelée « période d'usure accrue » reliée à une hausse significative de température indiquant la fin du cycle de vie de l'éprouvette [75].

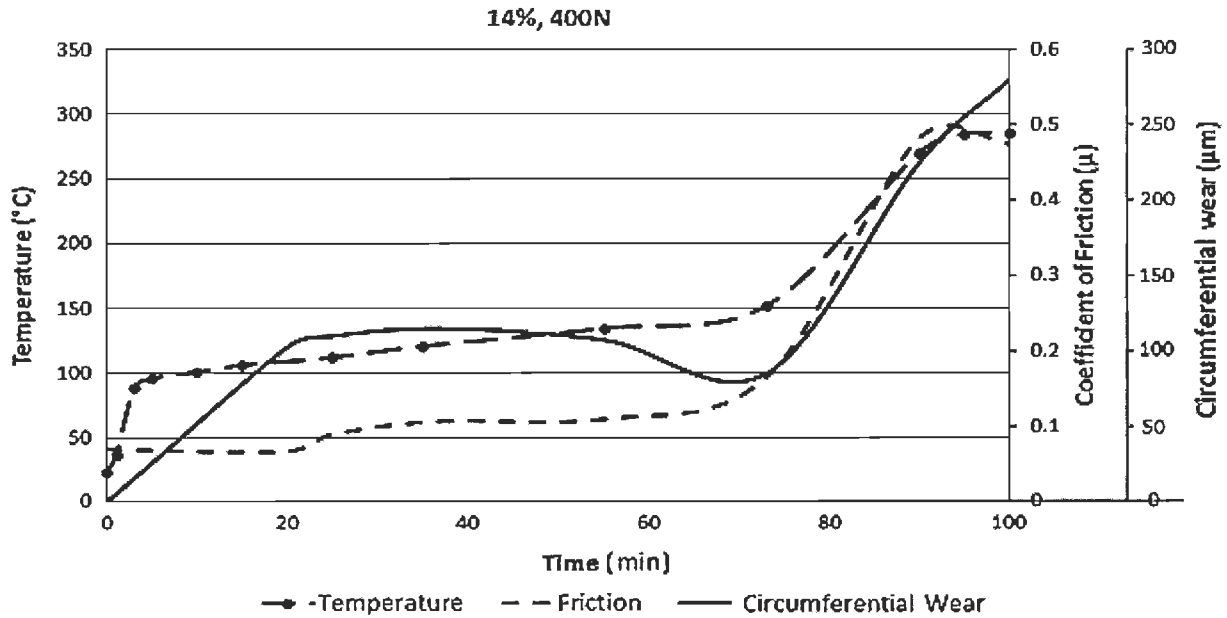


Figure 16 : Allure de la température, du frottement et de l'usure pour un rapport de glissement de 14% et une charge de 400 N [75].

Une autre étude menée par Koffi et al. (2016) a opté pour le perçage de trous de refroidissement à l'intérieur de l'engrenage en plastique. Cette opération a augmenté la durée de vie de l'engrenage de près de 415% et a diminué considérablement le taux d'usure [76].

Koffi et al. (1985) ont modélisé les composants de la génération de chaleur pour un engrenage en polyamide 6/6. Ils ont démontré que le chauffage par friction était responsable de la plus grande partie de la chaleur produite. Cela s'est avéré être le cas dominant sauf pour le roulement pur (c'est-à-dire au point primitif du contact des engrenages, où les vitesses de glissement sont nulles). En effet, en dehors de la ligne d'action, la déformation des dents s'accroît et les vitesses de glissement atteignent leurs sommets. Ceci génère des forces de frictions très importantes responsables à la hausse de la température des engrenages en contact [77-81]. Cette théorie était confirmée avec des tests de roulement/glissement de deux disques en polyamide [82].

2.2.7 Effet de la vitesse sur le comportement de tribologie des NFPC :

Bien que l'étude de l'effet de la vitesse sur la tribologie des engrenages en polymère relie un mouvement de glissement combiné à un roulement, il est aussi significatif d'évaluer la résistance à l'usure des NFPC dans des tests de glissement pur comme fait dans la plupart des travaux publiés dans la littérature. Dans ce contexte, Yousif et al. (2008) ont étudié le composite de polyester renforcé par des fibres de palmier à huile à l'aide d'un dispositif de « pin-on-disc » sur une distance de glissement de 3000 m [51]. Les valeurs du taux d'usure les plus basses ont été enregistrées pour la plus petite vitesse de glissement (1.7 m/s). Par ailleurs, les deux autres vitesses de glissement testées (2.8 m/s et 3.9 m/s) ne semblent pas avoir un effet significatif sur les taux d'usure mesurés. La figure 17 montre ceci :

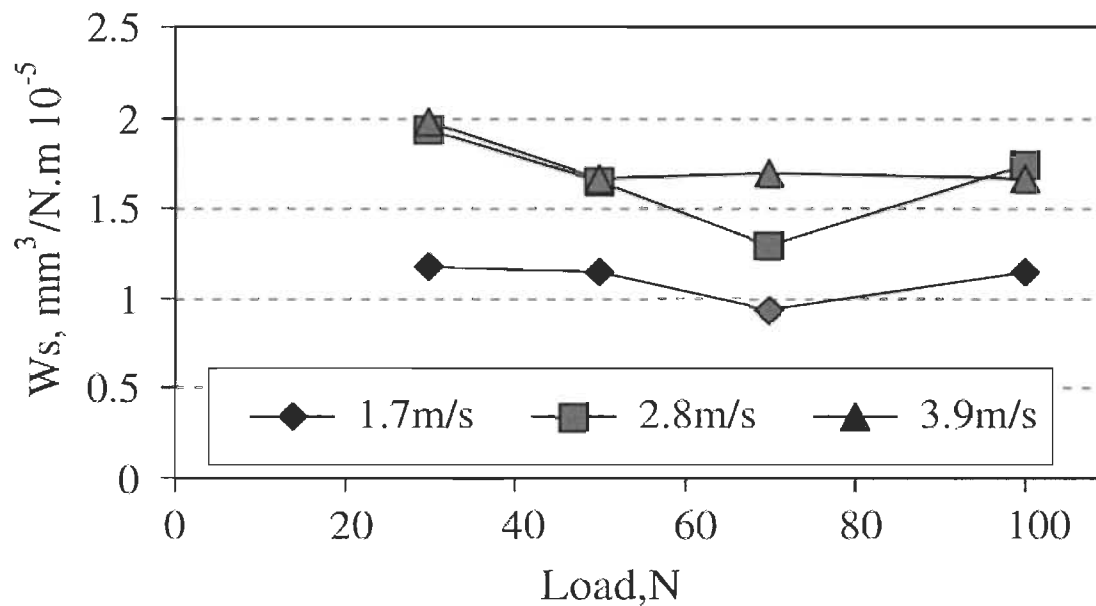


Figure 17 : Taux d'usure de l'OPRP/ SS à différentes charges appliquées à trois vitesses de glissement.

Yallem et al. (2014) ont réussi à montrer l'effet de la vitesse de glissement sur le taux d'usure spécifique d'un composite de polypropylène renforcé par des fibres de jute à l'aide d'un dispositif « pin-on-disc ». Il a été observé que sur une distance parcourue de 3000 m, le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse de glissement (Voir figure 18).

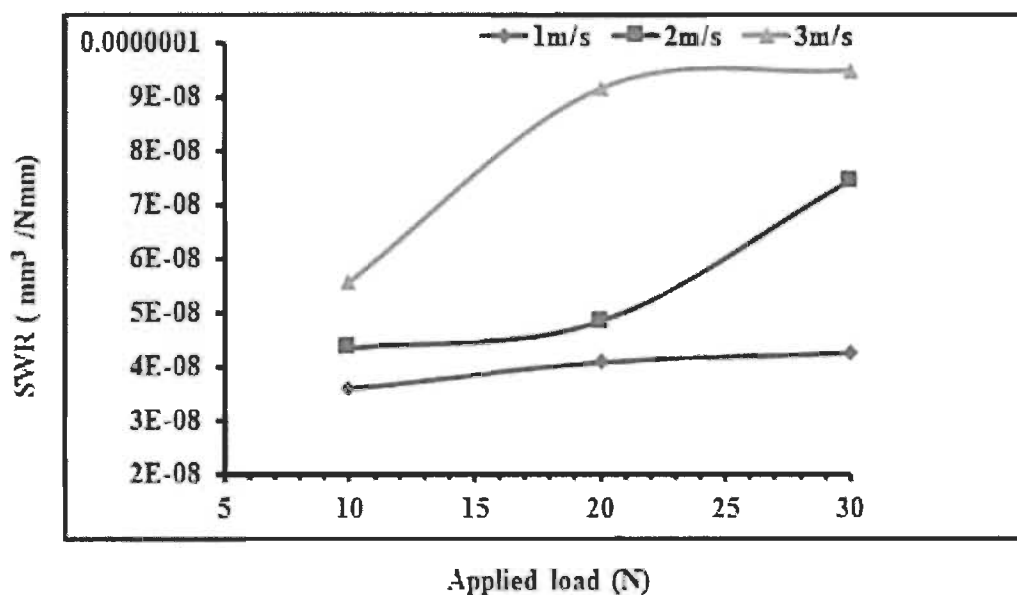


Figure 18 : Variation du taux d'usure spécifique en fonction de la charge à des vitesses de glissement différentes pour un composite Jute/PP [32].

En utilisant le même dispositif expérimental, Chin et al. (2009) ont étudié le comportement d'un composite d'époxy avec des fibres kénafe [23] (voir figure 19). On a démontré que la variation de l'usure dans le cas du composite est minimale voire quasi-inexistante contrairement à l'allure du taux d'usure de l'époxy vierge (NE) qui augmente considérablement avec la hausse de la vitesse de glissement.

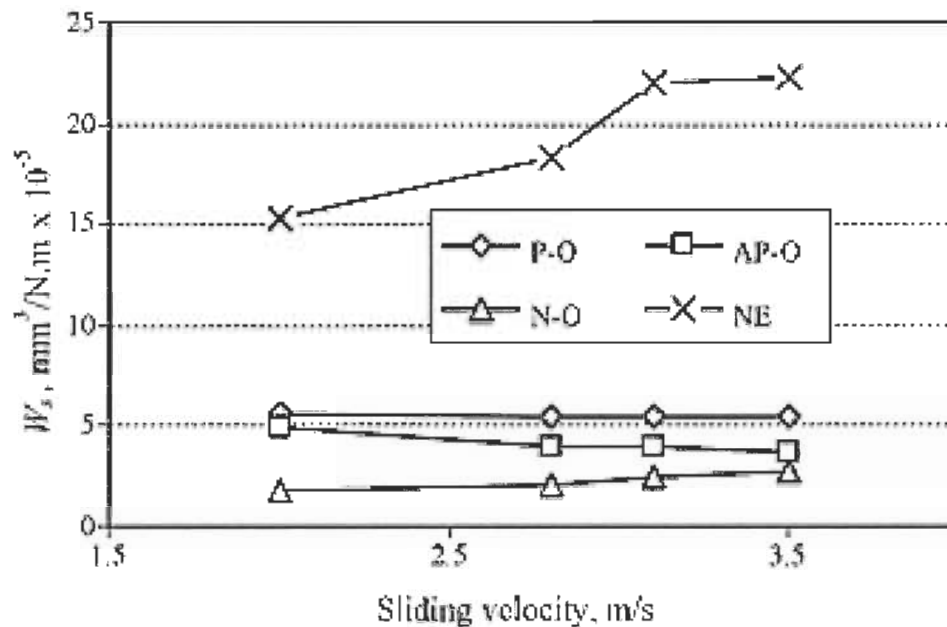


Figure 19 : Taux d'usure spécifique en fonction de la vitesse de glissement à 50N de charge appliquée pour différentes orientations de fibres de kénafe dans le composite d'époxy.

Kukureka et al. (1999) ont étudié l'effet du renforcement par fibres sur le frottement et l'usure du polyamide 66 sous roulement/glissement à sec. Bien que les trois types de fibres utilisées (aramide, carbone et verre) ne correspondent pas avec ceux étudiés dans cette thèse puisqu'il s'agit de fibres synthétiques, l'intéressant dans ce travail c'est que le comportement des matériaux renforcés diffère complètement de celui trouvé par les auteurs précédemment cités utilisant les tests « pin-on-disc » (éprouvette de composite glissant sur une surface métallique). En effet, il précise que lors des tests d'usure faits sur des polymères contre métal,

il y a formation d'une surface riche en fibres qui protège le composite en frottement, ce qui ne se fait pas lorsque les polymères sont utilisés contre eux-mêmes [83, 84].

2.2.8 Modes de bris des engrenages :

Les engrenages subissent généralement des contraintes complexes pendant le fonctionnement et peuvent s'endommager de plusieurs façons comme l'usure des dents d'engrenage, la fissuration de la surface de la dent, la fissuration de la racine des dents et les grandes déformations de la dent. La chaleur produite durant la phase d'engrènement par la friction, l'hystérésis de contact (sur la surface des dents) et l'hystérésis de flexion (dans la masse des dents) cause une distribution de température caractérisée par des élévations instantanées localisées dans la région du point de contact. Ce phénomène contribue à l'endommagement des engrenages à base de plastique [81].

Bravo et al. (2015) ont montré, comme illustré à la figure 20, qu'à de faibles valeurs de forces transmises (faibles charges appliquées), le mode d'endommagement le plus remarqué est l'usure [79].

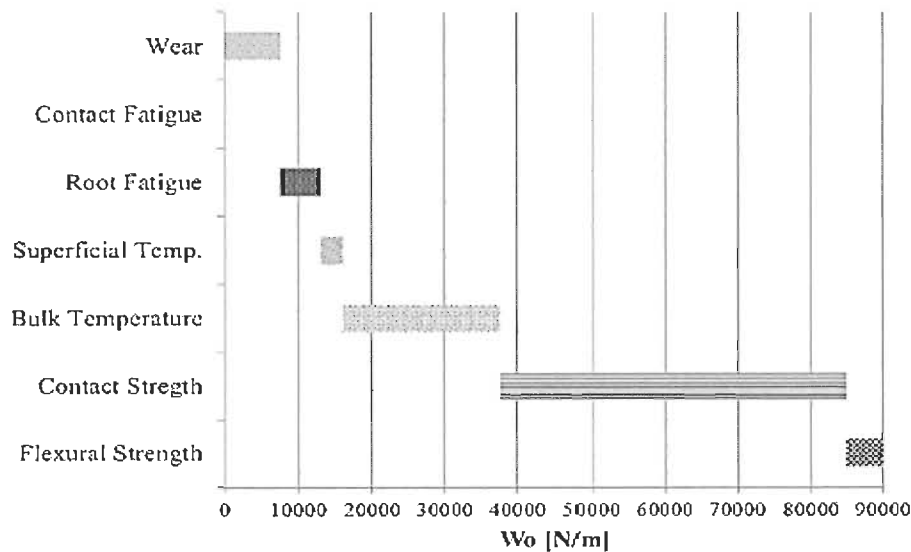


Figure 20 : Modes d'endommagement en fonction de la charge normale.

2.2.9 Simulation du contact des engrenages :

Historiquement, le comportement des engrenages en plastiques a été étudié expérimentalement avant d'être modélisé. Plusieurs auteurs l'ont décrit précisément et se sont tous mis d'accord sur le phénomène d'extension qui se produit en dehors de la ligne d'action. La figure 21 explicite ce phénomène se produisant durant le contact d'une paire d'engrenages en polymères. Elle montre l'existence de périodes de contact prématuré survenant avant le premier point de contact théorique (TFPC). Ainsi, le contact se prolonge après le dernier point de contact théorique (LPC).

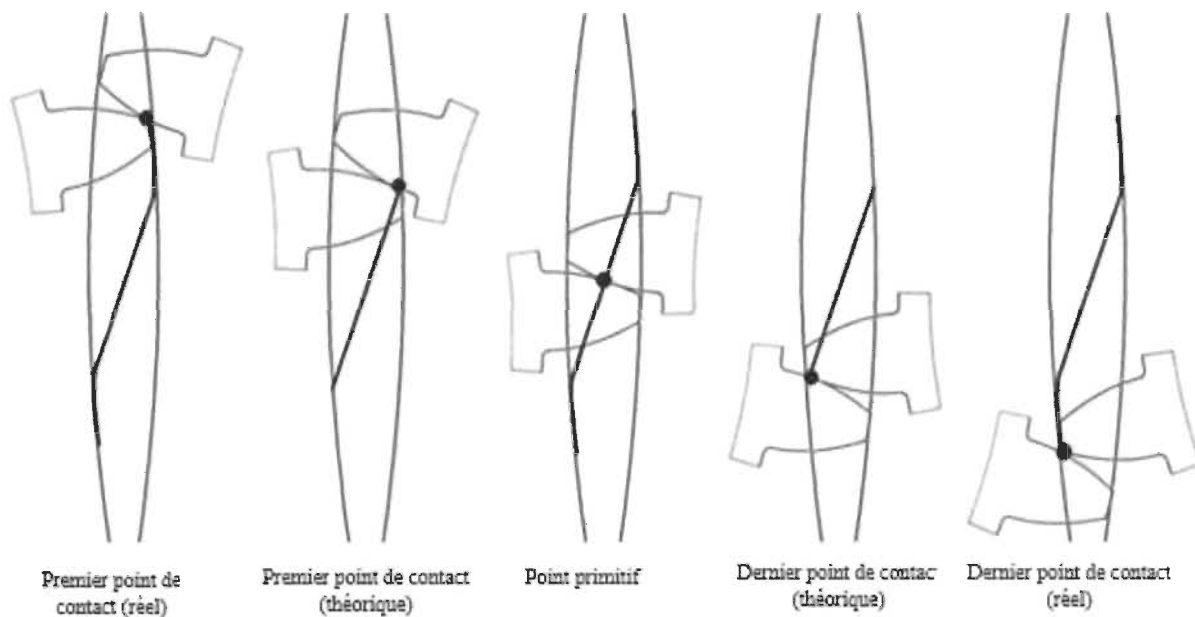


Figure 21 : Les lignes de contact réels et théoriques pour une paire de dents d'engrenage en polymère [85, 86].

La principale raison de ce comportement réside dans les grandes déformations observées dans les dentures polymériques. Au cours de la phase d'approche (contact prématuré), la pointe de la dent de la roue menée entre en contact avec la dent du pignon à proximité de son point primitif. Le contact continue ensuite sur les flancs des dents jusqu'à ce qu'ils soient tangents les uns aux autres, suivi d'un contact « normal » jusqu'au point de fin de contact théorique.

Durant cette phase, les dents subissent une déformation due à la charge transférée. Après ce point, les dents déformées tentent de retrouver leur forme d'origine ce qui provoque l'extension du contact du pignon le long de la roue dans la direction du point primitif. Quand le contact est étendu, la répartition de la charge entre les dents durant l'engrènement est modifiée.

Wright al. (2001) ont indiqué que le mouvement trouvé dans le contact des dents des engrenages est une combinaison de glissement et de roulement dans des proportions variables lorsque l'angle d'engrènement change. La charge transmise change au cours du cycle d'engrènement. En effet, elle est partagée avec une nouvelle dent entrant dans le contact et abandonnée par la suite par une dent sortant du contact. Cet effet de répartition de charge est encore plus compliqué par les changements du rapport de contact provoqués par la flexibilité de la dent. Ceci permet aux dents de rester plus longtemps en contact et par conséquent partager des charges sur des angles plus importants que ceux prévus par la géométrie [82-84, 87-93].

Bien que l'effet cumulatif de la déformation des dents puisse être néfaste sur la durée de vie des engrenages en plastique, la déformation de la dent durant l'engrènement est considérée assez avantageuse. En effet, le faible module des polymères était historiquement considéré comme souhaitable car la charge transmise est mieux répartie et les forces de contact sont réduites pendant le mouvement.

La différence entre les vitesses de roulement de chaque dent entraîne un glissement relatif entre les dents en contact. Le type de contact qui a lieu pendant le cycle d'engrènement de deux dents d'engrenage peut donc être modélisé par deux mouvements : roulement et glissement. L'étendue de chaque mouvement varie au cours du cycle et est différente pour l'engrenage menant et mené. La seule place dépourvue de glissement est le point primitif et la valeur du glissement relatif augmente plus aux extrémités de la dent ce qui provoque une plus grande quantité de friction et plus d'usure [77, 78, 80]. Bien que la vitesse de glissement et le taux de glissement semblent identiques pour les racines et les pointes de la dent, que ce soit sur la roue

menante ou menée, le sens de glissement est inversé par rapport au sens de roulement. Le sens de roulement est de la racine vers la pointe de la dent sur le pignon menant et de la pointe vers la racine de la dent sur la roue menée. Cependant, à la base du pignon menant, le sens de glissement est opposé au roulement, alors qu'il est identique à celui du bout. Le sens de glissement dans le menant est toujours à partir de la ligne d'action vers l'extérieur.

Inversement, sur la roue menée, la vitesse de glissement croît de la racine et de la pointe vers la ligne d'action. Cela conduit à nouveau au sens de glissement opposé au roulement à la racine et identique au roulement à la pointe. La situation dans laquelle la vitesse de glissement est opposée au roulement est appelée "phase d'approche", tandis que le glissement et le roulement bidirectionnels sont appelés "phase en retrait".

Dues aux directions du glissement relatif durant les différentes phases de contact des dents en engrènement, les formes d'usure varient particulièrement selon la position de l'engrenage. Les forces de frottement tendant à s'éloigner de la ligne d'action sur le pignon menant entraînent un 'creux' d'usure. Tandis que ceux qui convergent vers la ligne d'action sur la roue menée, donnent lieu à un "picotement" [72]. La figure 22 illustre l'effet du glissement relatif entre les dents des engrenages sur l'usure :

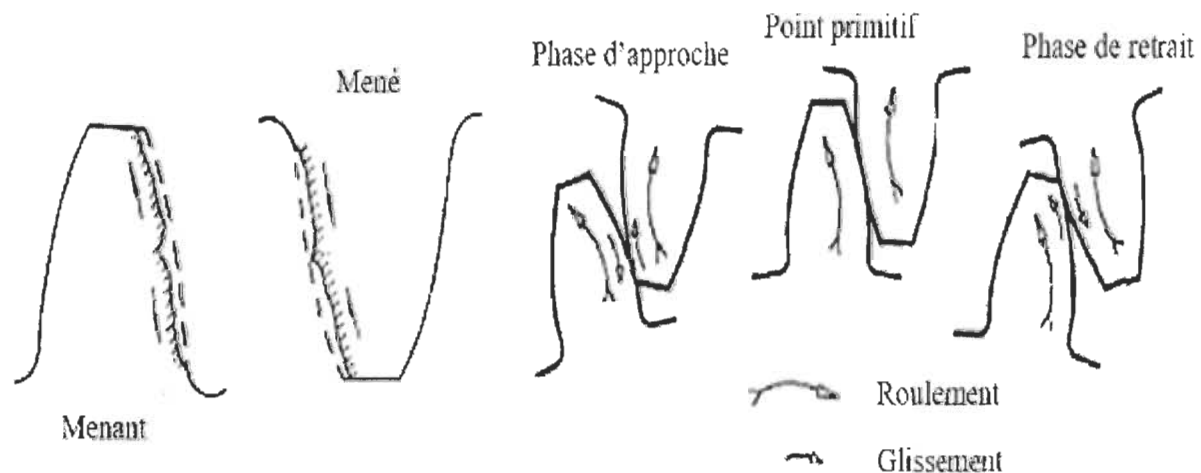


Figure 22 : Mécanisme de roulement et glissement au cours de l'engrènement [94].

Partant, il ne semble pas être judicieux d'utiliser des données provenant de tests d'usure communs, tels que l'essai « pin-on-disc », pour prédire les performances relatives des matériaux d'engrenages proposés. Il est moins juste de prévoir les effets des paramètres de fonctionnement sur le taux d'usure du polyéthylène à haute densité renforcé par des fibres de bouleau dans une géométrie bien particulière de l'engrenage à partir de telles données générales. Un moyen simple d'éviter ces distorsions est de produire des engrenages à partir du matériau d'intérêt et de les tester dans des conditions de fonctionnement proches de celles attendues en service. Cependant, cette approche n'offre pas la possibilité d'examiner les effets des variables étudiées séparément.

Afin de mieux comprendre les performances de tribologie d'un matériau dans une application d'engrenage, les conditions de contact à tout moment du cycle de l'engrènement peuvent être approximées en appliquant une combinaison de mouvement de roulement et de glissement à une paire de surfaces. Certains chercheurs ont utilisé des paires de disques, en contact périphérique, à des taux de glissement différents, pour créer de telles conditions comme montré à la figure 23. Il est simplement nécessaire de choisir des rayons de cylindre correspondant au rayon de courbure de chaque face d'engrenage au point de contact. Ainsi, le taux de glissement d'une paire d'engrenage en action se réfère au rapport entre la vitesse de glissement au point de contact et la vitesse de roulement [82, 83].

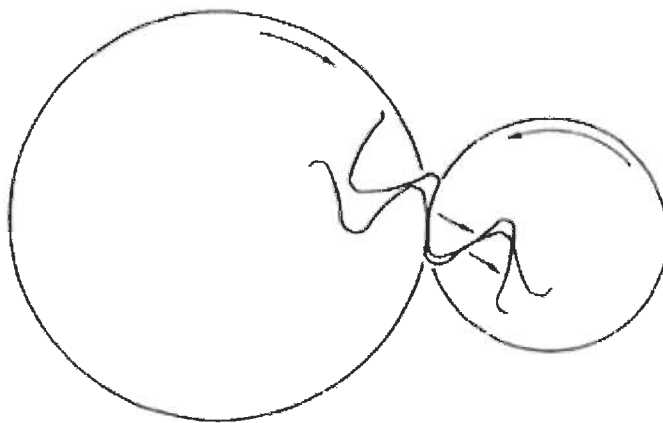


Figure 23 : Relation entre les dents d'engrenage et les disques en contact [95].

La simulation des engrenages par des disques ne peut jamais être totalement représentative, car, outre le fait du changement de vitesse de glissement, la flexibilité des dents et les conditions thermiques, les taux de glissement dans les essais sur disque double tendent à être limités à environ 30%, alors que les taux de glissement peuvent s'étendre au-dessus de 30% au long du cycle d'engrènement des engrenages comme le montre la figure 24. Par conséquent, les essais à double disque évaluent traditionnellement la réponse mécanique et de tribologie d'un matériau aux conditions rencontrées dans la région entourant le point de contact des engrenages, où la vitesse de glissement est faible.

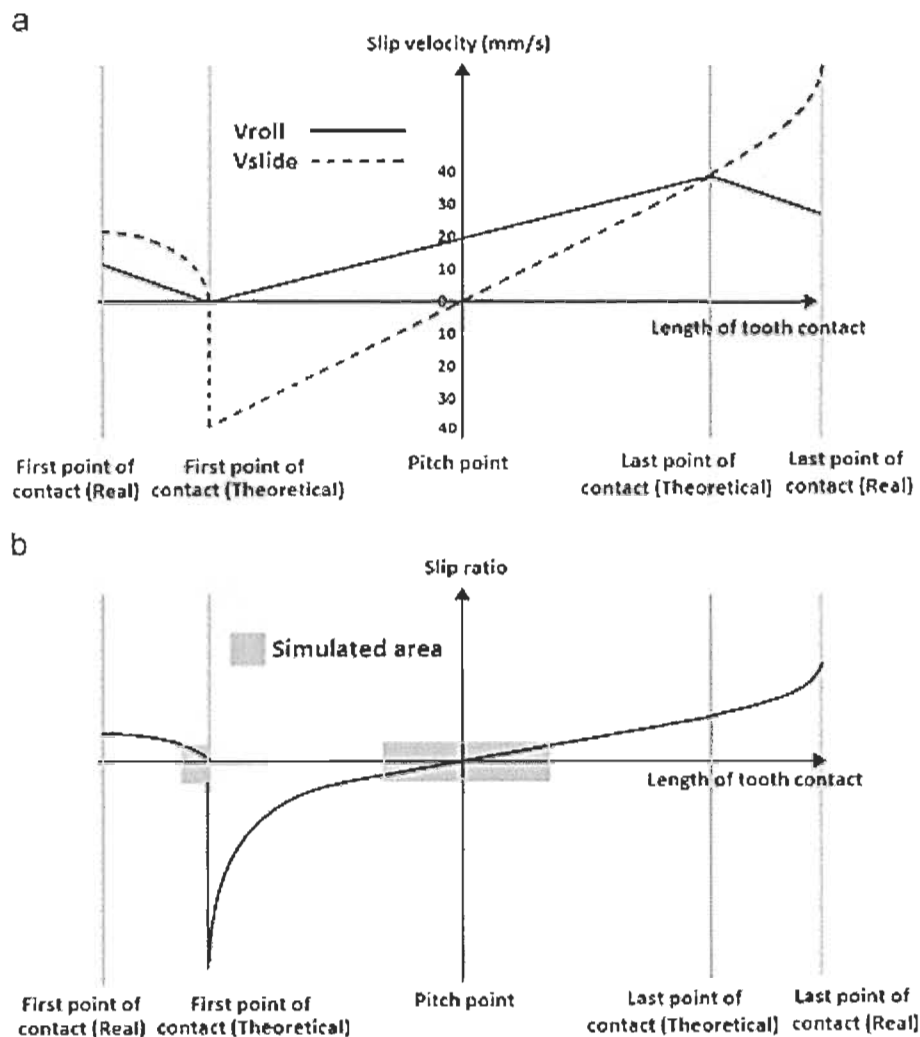


Figure 24 : (a) Allures de la vitesse de glissement (V_{slide}) et de roulement (V_{roll}), et (b) taux de glissement pour un contact d'engrènement en polymère: zones grises représentant des zones simulées lors de l'utilisation d'essais sur deux disques [87].

Cette figure montre les taux de glissement théoriques pour une paire de dents d'engrenage en contact et l'influence de l'extension dans la trajectoire de contact. Les taux de glissement des tests à double disque modélisera différentes positions de contact sur une dent d'engrenage simulée en fonction de la mesure dans laquelle l'extension de contact affecte le système. De plus, on peut voir que des taux de glissement pouvant atteindre 30% peuvent être obtenus avec des tests à double disque, simulant à la fois les régions entourant le point primitif et le premier point de contact théorique en cas de grandes extensions de contact.

2.2.10 Effet du taux de glissement

L'un des principaux effets de la modification du taux de glissement consiste en la modification de l'apport de chaleur dans le système de disques. Par conséquent, ceci entraîne la modification de la température de surface des disques. Ceci fournit alors un mécanisme pour évaluer l'effet de la température de fonctionnement sur les performances de tribologie des matériaux. M. Rao et al. (1998) ont étudié l'effet du PTFE comme renforcement sur le comportement de tribologie des polymères (le PA 66 et le poly acétal ou polyoxyméthylène POM) dans un contact de roulement/glissement. La figure 25 montre l'effet du taux de glissement sur le taux d'usure du POM à une vitesse de 1000 tr/min.

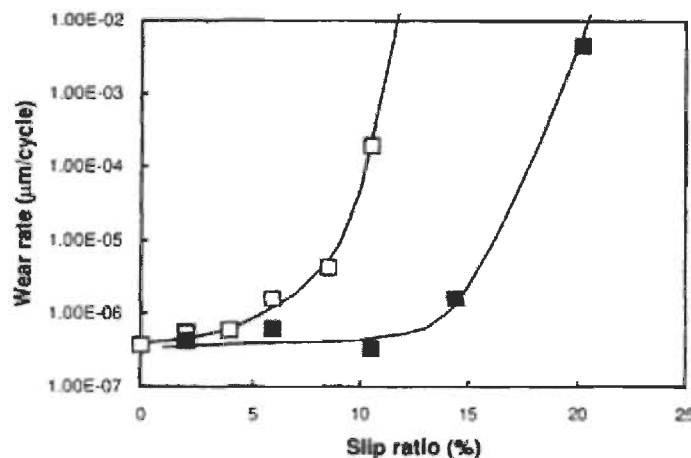


Figure 25 : Variation du taux d'usure avec le rapport de glissement pour : POM non renforcé à une charge 200 N (carreaux blancs) et POM renforcé avec PTFE à une charge 300 N (carreaux noirs) [91].

Pour le POM non renforcé, le taux de glissement inférieur à 4% n'a pas affecté le taux d'usure. Cependant, à mesure que le taux de glissement dépassait 4%, le taux d'usure a commencé à augmenter. L'usure de POM peut être divisée en trois régions : en dessous d'environ 5%, l'usure est considérée minimale et la plupart des polymères ont une durée de vie presque infinie (environ un an de fonctionnement continu pour une usure de 0,5 mm). Entre 5% et 8%, l'usure augmente considérablement mais elle peut encore être qualifiée de légère. Enfin, pour un taux de glissement supérieur à 8%, l'usure devient rapide et une usure sévère ou "éraflure" se produit. Lorsque le renforcement PTFE est inclus, la relation entre le taux d'usure et le taux de glissement reste similaire à celle du POM non renforcé, sauf que la courbe est décalée vers un taux de glissement plus élevé. On peut voir que au-delà d'environ 14% de taux de glissement, les taux d'usure sont très bas et sont similaires à ceux des POM non renforcé avec des taux de glissement entre 0% et 4%. Ensuite, l'usure augmente au fur et à mesure que le glissement augmente jusqu'à environ 17%. La transition entre l'usure légère et l'usure sévère se produit maintenant autour de 17% au lieu de 8%.

On peut voir sur la figure 26 que pour des taux de glissement élevés, le taux d'usure est vraiment important. Cela est dû à la hausse de température de surface du PA 66 non renforcé.

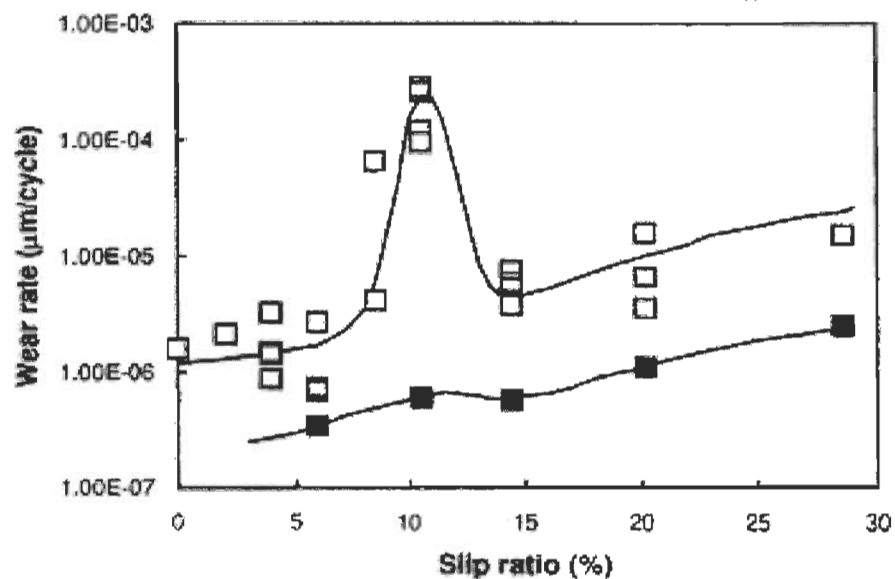


Figure 26 : Variation du taux d'usure avec le taux de glissement pour : PA66 non renforcé (carreaux blancs) et PA66 renforcé par du PTFE (carreaux noirs) [91].

Lorsqu'ils sont renforcés de PTFE, les POM et PA66 présentent des coefficients de frottement faibles et des taux d'usure comparables à ceux du POM non renforcé à faible glissement [91].

2.3 Mesure de l'usure

Un critère d'évaluation doit être établi avant que les résultats du test puissent être évalués. Comme Krause et al. (1987) l'ont suggéré, le principal critère d'évaluation des effets des paramètres de fonctionnement nominaux est le taux d'usure déterminé. L'usure étant une caractéristique du système, les valeurs d'usure ne sont, à proprement parler, valables que pour l'ensemble des conditions dans lesquelles elles sont mesurées [96]. Il existe de nombreuses façons pour définir le taux d'usure par roulement/glissement. Hutchings (1989) a défini la masse usée par unité de distance de glissement comme étant le taux d'usure [97], mais Clayton et al. (1984) et Adachi et al. (1991) ont défini le taux d'usure comme masse usée par unité de distance de roulement [98, 99]. Beynon et al. (1988) ont utilisé la perte de volume par unité de distance glissée comme taux d'usure à partir de la mesure du volume usé des matériaux [100, 101]. Sato et al. (1993) ont utilisé la perte de volume par unité de cycle de rotation [102] et Gamham et al. (1991) ont utilisé les deux [103]. Dans l'approche du mécanisme, un coefficient d'usure 'k' est souvent utilisé, la seule différence étant que la distance de roulement ou de glissement est utilisée comme référence. Adachi et al. (1991) ont utilisé le premier et Karamis (1991) a utilisé le second. De plus, Krause et al. (1987) ont défini le taux d'usure comme une diminution du rayon par cycle de rotation [96, 99, 104].

Cependant, le coefficient d'usure 'k' découle de l'hypothèse d'un mécanisme d'usure adhésif et il est impossible pour k de couvrir d'autres mécanismes d'usure, tels que la fatigue, la déformation et l'abrasion, etc. Il existe tellement de mécanismes d'usure possible qu'il

semble impossible d'associer une définition du taux d'usure à un mécanisme d'usure typique. Par conséquent, il est raisonnable et pratique de définir un taux d'usure comme une unité de mesure pure similaire à un mètre, un gramme, etc. Dans notre cas, l'objet de mesure qu'on a utilisé dans ce travail est essentiellement la perte de masse. En effet, on a pesé les échantillons avant et après les tests dans les mêmes conditions de température et d'humidité. Par ailleurs, les formules reliées à la mesure et la comparaison de l'usure dans cette thèse, que ce soit dans la revue bibliographique ou bien dans notre méthodologie sont démontrées ici :

La quantité d'usure peut être exprimée par les formules suivantes :

$$\text{Quantité d'usure} = \text{perte de masse (kg)} \quad (2.2)$$

$$\text{Quantité d'usure} = \text{changement dimensionnel linéaire (m)} \quad (2.3)$$

$$\text{Quantité d'usure} = \text{perte de volume (m}^3\text{)} \quad (2.4)$$

La résistance à l'usure est :

$$\text{Résistance à l'usure} = \frac{1}{\text{quantité d'usure}} \text{ (m}^{-1}\text{, m}^{-3}\text{, Kg}^{-1}\text{)} \quad (2.5)$$

Dépendamment de la façon utilisée pour quantifier l'usure, le taux d'usure peut être exprimé par l'une des formules suivantes :

$$\text{Taux d'usure} = \frac{\text{quantité d'usure}}{\text{distance de glissement}} \text{ (m/m, m}^3\text{/m, kg/m)} \quad (2.6)$$

$$= \frac{\text{quantité d'usure}}{\text{temps de glissement}} \text{ (m/s, m}^3\text{/s, kg/s)} \quad (2.7)$$

Le coefficient d'usure ou le taux d'usure spécifique (parfois aussi appelé facteur d'usure) =

$$\frac{\text{taux d'usure}}{\text{force normale}} \text{ (m}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}\text{)} \quad (2.8)$$

CHAPITRE 3 – MÉTHODOLOGIE

La plupart des travaux publiés sur la tribologie des polymères renforcés par des fibres naturelles concernent la performance des engrenages. Cependant, pour une paire de roues d'engrenage, les paramètres de fonctionnement dominants tels que le taux de glissement, la vitesse de roulement et la charge ainsi que les paramètres géométriques tels que l'état et la courbure des surfaces de contact varient avec la position de contact. Il est donc très difficile d'interpréter les mécanismes d'usure des engrenages en polymère. Il existe clairement une relation entre le mécanisme d'usure et la vitesse de glissement mais ceci est obscurci par l'interaction entre l'usure et la répartition de la charge. L'usure réduit la charge de contact aux extrémités des dents et l'augmente près du point primitif [74, 84, 92]. Afin de contourner toutes ces problématiques et contrôler les paramètres en jeu avec précision, la méthode suivie dans ce travail consiste à appliquer les mêmes conditions de charge, vitesse de roulement et de glissement à l'aide d'un essai normalisé de tribologie à double disques.

Bien que des gammes de matériaux semblables ont été étudiées à l'aide de techniques d'usure par roulement/glissement à double disques, rares sont les tentatives de comparer directement les résultats de ces études avec ceux des essais d'engrenage.

Ce travail présente une comparaison du comportement à l'usure de la combinaison des disques en HDPE renforcés par des fibres de bouleau testés sur un tribomètre avec des essais effectués sur un banc simulant le fonctionnement réel des engrenages fabriqués à partir du même matériau.

3.1 Matériaux :

Les fibres sélectionnées pour cette étude sont des fibres courtes industrielles (TMP, 35 mesh) de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) employées comme renfort pour le bio composite. Elles ont été produites par le Centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques de Trois-Rivières (Canada) et ont été séchées à 60 °C dans un four à circulation d'air pendant 24 heures avant leur utilisation. La densité des fibres de bouleau est de 0.62 g/cm³.

La matrice utilisée pour la fabrication du matériau est le HDPE (SCLAIR® 2909) offert par Nova Chemicals avec une densité de 0.962 g/cm³, un indice de fluidité de 20.0 g/10 min et un taux de cristallinité de 85%. Le MAPE (polyéthylène maléate, G2010), fabriqué par Eastman Chemical Company (Kingsport, TN, É.-U.) contenant 1.5 % d'anhydride maléique, a servi comme agent de couplage (AC). Sa densité est de 0.92 g/cm³ [105]. Afin d'assurer une bonne adhésion entre les fibres et la matrice, on a utilisé 3% en masse de AC [106].

3.2 Préparation des échantillons :

Pour la fabrication des engrenages et des disques, on a utilisé la technique de moulage par compression. On a commencé par préparer une pâte du composite dans un broyeur à deux cylindres (Thermon CW Brabender, modèle T-303) avec un rapport de démultiplication de 0,6. Les grains de la matrice ont été fondus sur des rouleaux à 170 °C, et les fibres ont été ajoutées par la suite au pourcentage massique désiré (de 0 à 40 % en poids). Afin d'obtenir une meilleure homogénéité, on commence par mélanger 20 % du total souhaité de HDPE avec le MAPE (3%). Ensuite, on rajoute le reste du HDPE avec les fibres de bois à petites quantités durant 7 minutes. On mélange 5 fois pendant 5 minutes (25 minutes au total) [8]. La pâte ainsi obtenue est coupée

en lamelles et amenée à la machine à granules Furnas afin de la broyer. Durant le broyage, on a utilisé la même filière pour uniformiser la taille moyenne des granules.

Ensuite, les échantillons ont été produits au moyen du procédé de moulage par compression en utilisant une presse hydraulique durant un cycle de cuisson de 20 minutes, à une pression de 30 bar et à une température des plaques atteignant 170 °C. Afin de minimiser les défauts de fabrication, le moulage est effectué en trois étapes : La première étape consiste à placer le moule dans la presse et appliquer 15 bar de pression pendant 5 min. Par la suite, on a monté la pression à 25 bar durant 10 minutes, ce qui permet de bien répartir la matière et éviter la formation de porosités. Dans la troisième étape, la pression monte à 30 bar durant 5 minutes ce qui permet d'obtenir une très bonne planéité des échantillons [8].

Enfin, on refroidit l'ensemble de presse par l'eau froide circulant dans des serpentins dans les plaques chauffantes pour 10 min jusqu'à une température d'environ 60° C, soit un taux de refroidissement de 13 °C/min (on parle ici d'une température permettant une rigidité suffisante du plastique pour le démoulage ; il est assuré que le plastique sera solide). Une fois le moule froid, les échantillons sont extraits avec soin. Le processus de fabrication des échantillons est illustré dans la figure 27 :

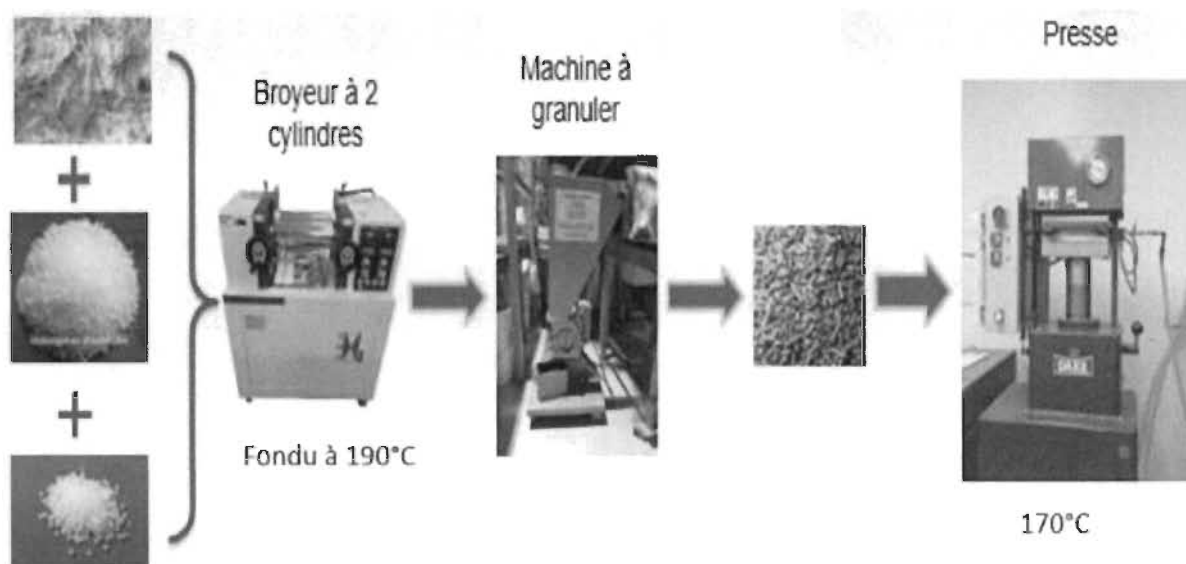


Figure 27 : Schéma explicatif du procédé de fabrication des bio composites par moulage.

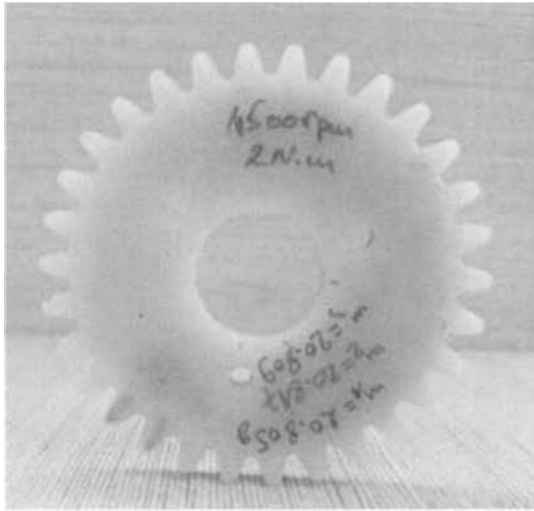
En se basant sur des expériences antérieures et en mettant beaucoup d'attention à maîtriser le procédé de fabrication à chaque étape, on a essayé de minimiser les défauts de fabrication. Néanmoins, il existe quand même des défauts apparents sur quelques échantillons comme par exemple un manque de matière sur la surface de l'échantillon ou au niveau de la denture dans le cas des engrenages dû au collage sur le moule de fabrication ou même l'apparition de fines bulles d'air à l'intérieur de l'échantillon dû à un défaut de tassage de la matière dans le moule et un manque de moyen d'évacuation d'air. C'est pour cela qu'on a opté pour un tri de sélection des bons échantillons en excluant toutes sorte d'anomalie de fabrication (défauts de forme, de moulage, de tassage). Ensuite, on a passé à la mesure du diamètre extérieur et la vérification de l'état de circularité de l'échantillon à l'aide d'une machine à contact de mesure d'écart de forme tridimensionnelle. Les échantillons retenus ont une circularité parfaite à une erreur admise de l'ordre de 5 microns.

Une fois les échantillons mesurés et vérifiés, les données fournies par la machine de mesure d'écart de forme tridimensionnelle sont introduites sur une machine de perçage à commande numérique afin de faire les trous de centrage usinés servant au montage respectif des engrenages sur le banc d'essai des engrenages et des disques sur le tribomètre. Les paramètres géométriques des engrenages conçus sont résumés dans le tableau 8 :

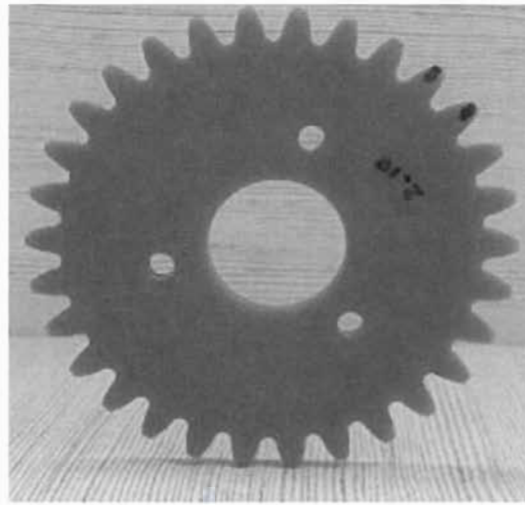
Tableau 8 : Paramètres des engrenages conçus

Nombre de dents	30
Angle de pression	20°
Pas diamétral P (po^{-1})	10
Module m (mm)	2.54
Largeur de l'engrenage b (mm)	6.5

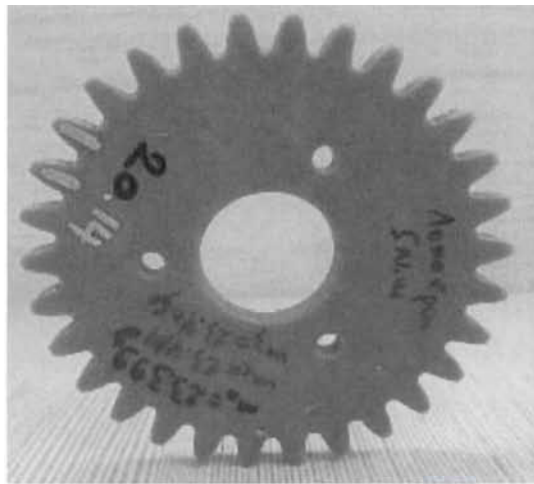
La figure 28 montre l'état des engrenages obtenus à différents taux de fibres de bouleau allant de 0%,10%, 20%, 30% et 40%.



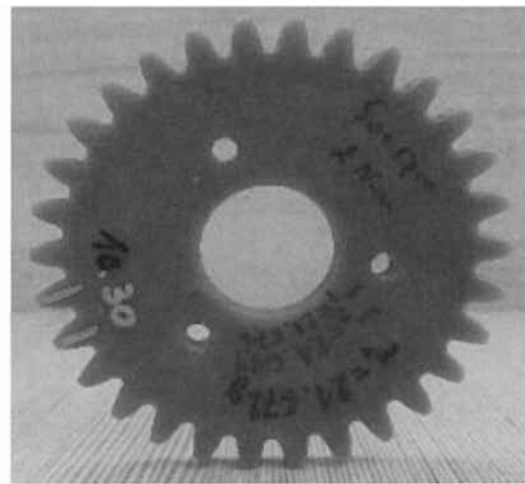
(0 %)



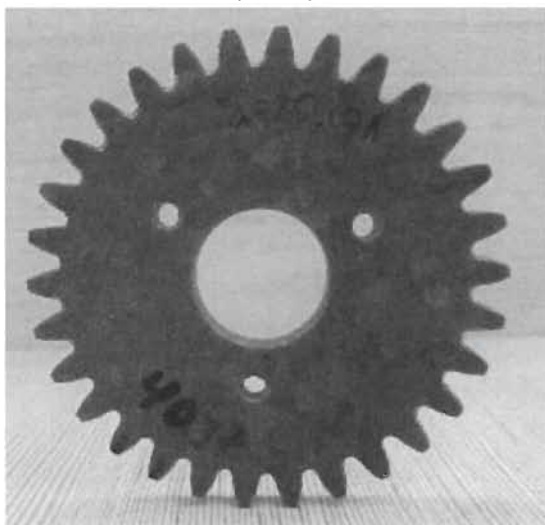
(10 %)



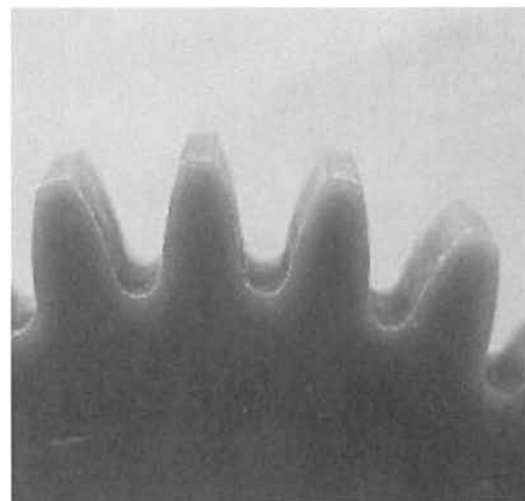
(20 %)



(30 %)



(40 %)



Etat des dents

Figure 28 : Etat des engrenages fabriqués de 0,10,20,30 et 40% wt.%.

Une préparation rigoureuse des disques est essentielle pour obtenir des résultats reproductibles et assurer le bon fonctionnement de la machine. Trois paramètres importants peuvent affecter la performance des matériaux dans la machine : Dimensions, traitements des surfaces, propriétés des surfaces d'essai. Les arbres supérieur et inférieur seront parallèles lorsque la distance entre leurs centres est de 60 mm. Si les dimensions de l'éprouvette font que l'axe de l'arbre n'est pas horizontal, les surfaces de contact seront désalignées et une usure inégale se produira, c'est pour cela qu'on a opté pour un usinage des disques pour obtenir le bon diamètre. Quelques détails de l'état des échantillons (disques) obtenus à différents taux de fibres de bouleau sont illustrés à la figure 29 :

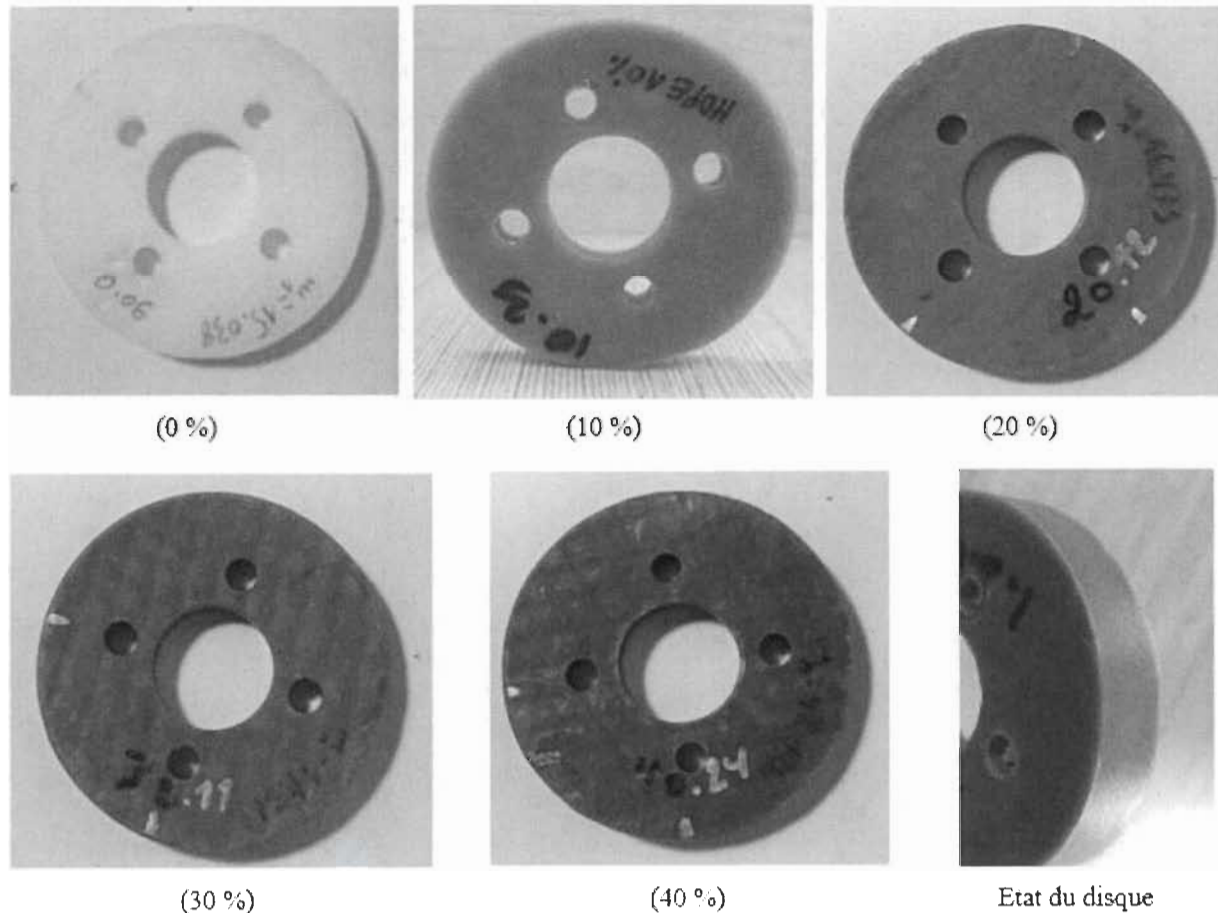


Figure 29 : Etat de quelques disques fabriqués.

3.3 Etude expérimentale :

Les propriétés de tribologie des polymères sont beaucoup plus sensibles à la température que celles des métaux ; il est donc nécessaire d'établir les températures de contact afin que leurs effets sur le comportement à l'usure puissent être pris en compte. Dans cette étude, un capteur de température à imagerie thermique FLIR A35 FOV 48 d'une résolution de 320 x 256 pixels et d'une plage de température de -40 à 550°C (-40 à 1022°F) et d'une précision de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 9^{\circ}\text{F}$) ou $\pm 5\%$ de la lecture a été utilisée pour mesurer la température dans les deux types d'essais réalisés.

3.3.1 Essai sur banc d'engrenages :

3.3.1.1 Présentation du dispositif :

Deux roues d'engrenage sont mises en rotation l'un contre l'autre sur le banc d'essai. À partir d'un ordinateur lié à la machine, on peut appliquer un couple sur l'une des deux roues d'engrenage. Au début, la machine est lancée sans charge, ce qui donne le temps de régler la bonne vitesse de rotation. Un tachymètre stroboscopique est utilisé pour vérifier la vitesse. Par la suite, le couple est appliqué progressivement pour ne pas endommager les échantillons sous test (Voir la figure 30).

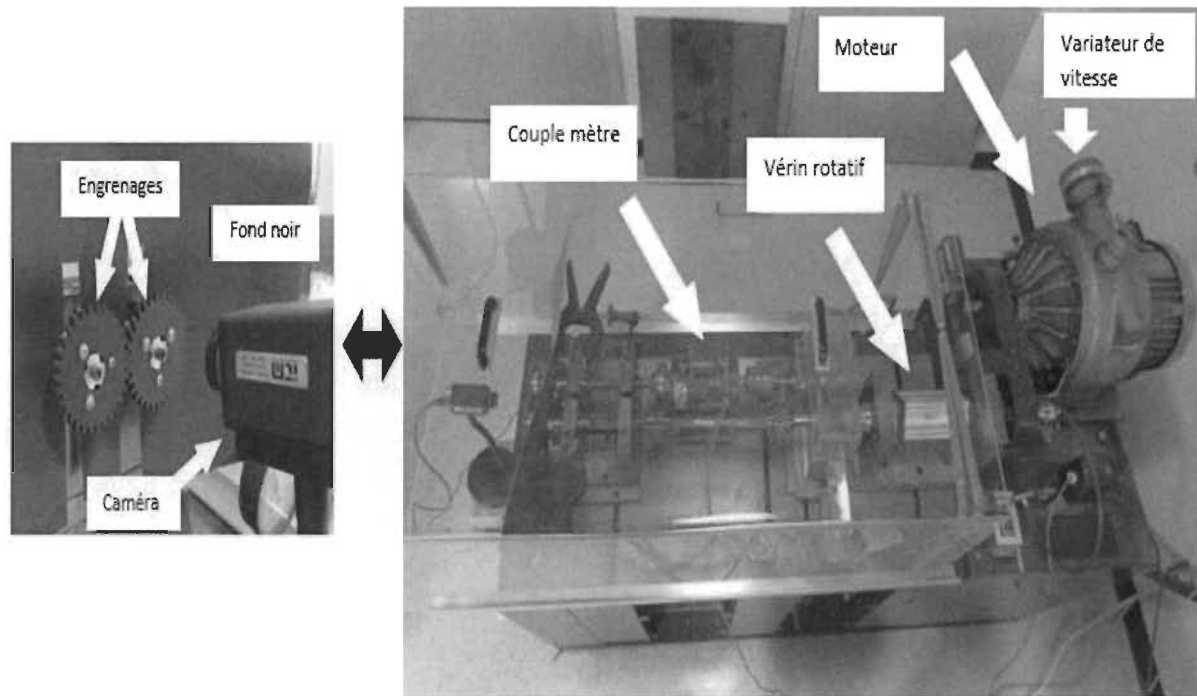


Figure 30 : Banc d'essai à engrenages.

3.3.1.2 Principe de fonctionnement :

Le banc d'essai des engrenages est une machine permettant de simuler une charge appliquée sur un système d'engrenages en fonctionnement réel. Un moteur électrique (Louis Allis®, Type PJMX, 575 Volts, 3 HP) couplé à un variateur de vitesse (Cleveland © Series 66A, size 6K42M) permet la rotation d'un premier arbre sur lequel un engrenage en acier et un vérin pneumatique rotatif sont fixés. Le vérin rotatif permet d'appliquer un couple sur l'arbre tandis que l'engrenage entraîne un deuxième arbre en rotation. Le vérin rotatif est commandé par régulateur pneumatique à commande électrique. Un couple-mètre est installé sur le deuxième arbre permettant de mesurer le couple appliqué. Il le convertit en un signal électrique avant l'envoyer à une carte analogique d'instrumentation (USB NI myDAQ). Au bout des deux arbres, des supports permettent de fixer les roues d'engrenages d'essai. Sur une interface

LabVIEW, un logiciel fonctionnant en boucle fermée permet d'appliquer, contrôler et varier le couple. Le logiciel est équipé d'un correcteur proportionnel intégral permettant d'améliorer les performances du système [105].

3.3.1.3 Plan d'expérience :

Afin de toucher à toutes les combinaisons possibles, on a joué sur une large plage de paramètres de fonctionnement ; on a fabriqué des engrenages de 0, 10, 20, 30 et 40 % en teneur de fibres.

Etant donné que le couple admissible pour une roue d'engrenage de 40 % en masse de fibres roulant à une vitesse donnée de 500 tr/min est de 12.5 N.m [8], on a choisi de baisser la marge des couples à appliquer de la moitié du couple admissible pour retenir quatre valeurs (2 N.m, 4 N.m, 5 N.m et 6 N.m) afin de pouvoir jouer sur trois vitesses de rotation (500 tr/min, 1000 tr/min et 1500 tr/min). La durée de chaque test est de quatre heures [73, 74]. La température ambiante dans le local où se déroulent les tests varie entre 20 et 24°C. Les variables de fonctionnement sont résumées dans le tableau 9 :

Tableau 9 : Variables de fonctionnement

Facteur de contrôle	Niveaux					Unités
Taux massique de fibres	0	10	20	30	40	Wt.%
Couples	2	4	5	6		N.m
Vitesse de rotation	500	1000		1500		Tr/min

3.3.2 Essai normalisé de tribologie :

3.3.2.1 Présentation du dispositif :

Une alternative à l'étude de l'usure des engrenages consiste à simuler les conditions de contact sur une géométrie beaucoup plus simple. Un exemple d'une telle simulation est l'utilisation de deux disques circulaires chargés l'un contre l'autre en contact bord à bord et tournant à des vitesses différentes dans un test normalisé. En faisant varier la charge appliquée et les vitesses relatives des disques, on essaye au maximum de simuler la charge normale, le taux de glissement et les conditions de vitesse de glissement rencontrés dans le cas des dents des engrenages en contact. Ce procédé a l'avantage d'appliquer une usure uniforme et stable sur les surfaces en contact en évitant les problèmes découlant des accélérations de la vitesse de glissement et les zones de glissement nul au point primitif. Ce test permet également de clarifier l'effet de la charge appliquée sur la zone de contact contrairement au cas des engrenages où la charge est souvent partagée par deux dents en contact.

Les essais normalisés ont été effectués sur la machine : tribomètre « TE 53 'PLINT PARTNER' » du laboratoire de génie mécanique à l'Université du Québec à Trois-Rivières selon la norme ISO 7148-2:2012 [107] (Voir figure 31).

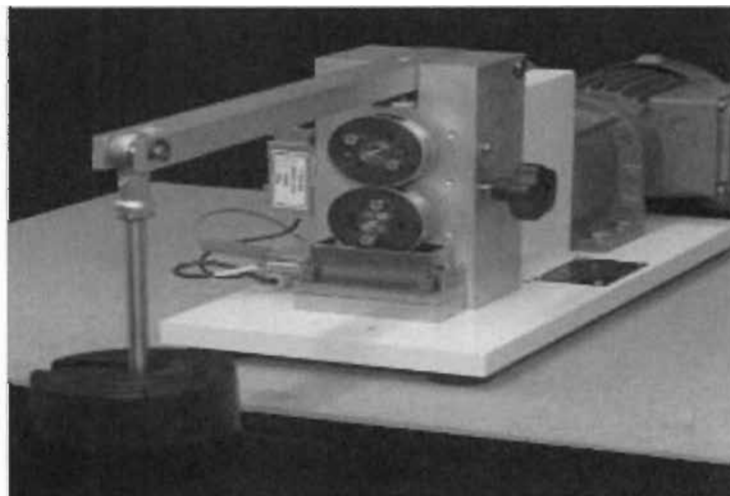


Figure 31 : Tribomètre TE 53 « PLINT PARTNER ».

L'appareil utilisé est décrit en détail dans la section suivante et représenté sous forme schématique sur la figure 32 :

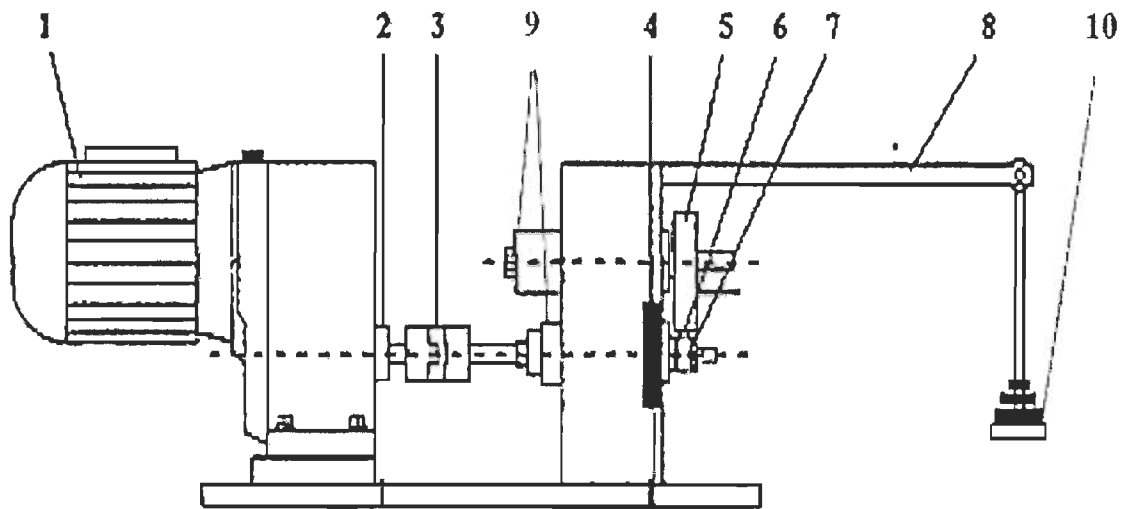


Figure 32 : Vue schématique du tribomètre : 1- moteur d'entraînement, 2- tachymètre, 3- accouplement, 4- capteur de force, 5- échantillon, 6- porte échantillon, 7- contre face, 8- support de poids, 9- système de transmission, 10- poids mort

3.3.2.2 Principe de fonctionnement :

Le tribomètre est un simple appareil d'usure utilisé, entre autres, pour les essais de roulement/glissement à deux disques (voir figure 32 et suivre la légende). Deux disques cylindriques (5) à tester sont montés sur des broches ou portes échantillons (6) contenues dans un bloc de friction et un bloc de chargement pivotant. Un moteur électrique (1) entraîne les disques à des vitesses pouvant varier de 0 à 850 tr/min à travers un système de transmission (9). En changeant les engrenages dans la chaîne de transmission, le rapport de glissement relatif au contact entre les disques peut être ajusté (voir figure 33).

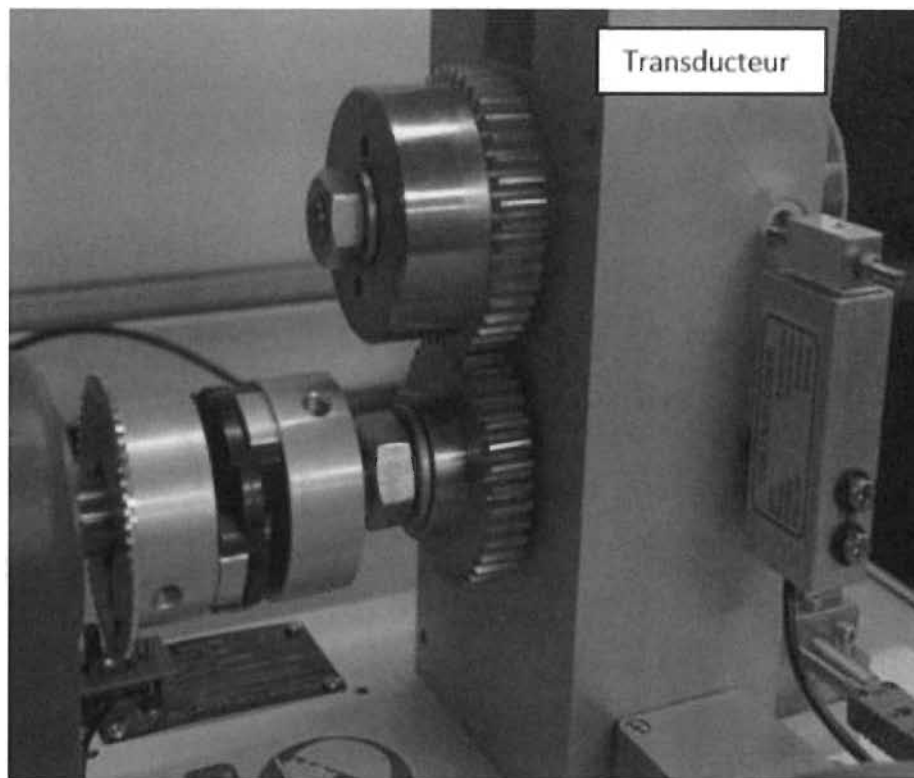


Figure 33 : Chaîne de transmission du tribomètre.

Les charges sont appliquées par un poids mort (10) au moyen d'un levier de rapport 5 : 1 (8) sur le bloc de chargement pivotant supérieur afin de fournir une force normale. Le mouvement horizontal dans la direction perpendiculaire à l'axe de la broche supérieure est mesuré par un transducteur à jauge de contrainte (voir figure 33). Cela donne des mesures des forces tangentielles dans le contact qui sont affichées comme force de frottement sur l'unité de commande. L'usure des échantillons est suivie directement sur l'ordinateur en détectant le déplacement du bloc supérieur (bloc de chargement) à l'aide d'un transducteur de déplacement variable linéaire (LVDT) chargé par ressort monté au-dessus de celui-ci pour enregistrer le déplacement vertical du disque supérieur (voir figure 34).

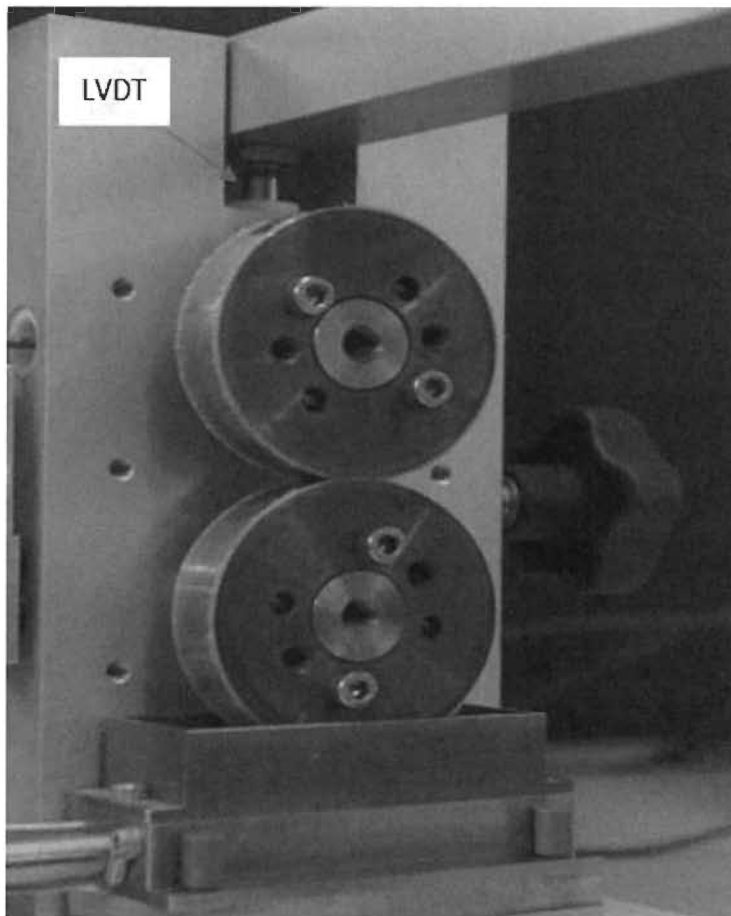


Figure 34 : Illustration des disques et du LVDT.

Les capteurs ont été soigneusement calibrés et les signaux de frottement et d'usure ont été convertis en données numériques et acquis par un système d'enregistrement sur ordinateur pour fournir un enregistrement continu des frottements et de l'usure au cours des tests.

Le TE 53 dispose d'un contrôle programmable séquentiel basé sur PC et d'une acquisition de données. Ceci est fourni par un module d'interface Serial Link intégré et le logiciel COMPEND 2000 installé sur un PC hôte compatible avec le système d'exploitation Microsoft Windows. Ce logiciel permet l'accès aux différents paramètres de la machine, ainsi que la programmation de séquences d'essais. Les données sont enregistrées durant les essais sur un disque dur dans des formats de fichiers compatibles avec un tableur standard (.csv ou .tsv).

Une séquence d'essai contient des étapes. Chaque étape définit les valeurs des consignes, la fréquence de l'acquisition de données et les niveaux d'alarmes des différents

paramètres/signaux de la machine. Les séquences sont enchaînées sauf si elles sont interrompues par l'opérateur ou par une alarme.

Pour les essais actuels, les disques supérieur et inférieur avaient un diamètre de 60 mm et une largeur de face de 10 mm.

- **Contact combiné de roulement/glissement :**

Ce type de contact utilise deux disques chargés l'un contre l'autre et entraînés en rotation par un engrenage fixe. Le disque inférieur est monté sur l'arbre moteur et le disque supérieur est monté sur un arbre entraîné par une paire de roues donnant un rapport de glissement/roulement fixe. Ce type de configuration d'essai est utilisé pour simuler les conditions rencontrées en pratique dans les contacts tels que les engrenages.



Figure 35 : Montage disque sur disque avec schématisation de la force de la charge appliquée

- **Etalonnage de l'usure**

L'usure des matériaux peut être exprimée en termes de taux d'usure spécifique. Cette grandeur tient compte de plusieurs paramètres tels que la quantité d'usure pouvant être exprimée par plus qu'une façon, la charge et la distance de glissement ou le temps de glissement. Durant ce travail, on s'est basé sur la perte de masse en (kg) pour quantifier l'usure.

Voulant clarifier les différentes méthodes utilisées pour la quantification de l'usure par d'autres auteurs référés dans le premier chapitre, on présente les équations suivantes.

Le taux d'usure spécifique peut être défini comme suit :

$$\text{Taux d'usure spécifique} = \text{volume d'usure} / (\text{charge} \times \text{distance de glissement}) \quad (3.1)$$

Le volume d'usure peut être déterminé à partir des changements de dimensions ou bien à partir des changements de poids du disque. Pour cette dernière mesure, le poids du disque est enregistré avant et après l'essai et le volume retiré est alors calculé à l'aide de l'équation 3.2 comme suit :

$$\text{Volume d'usure} = (M-m) / \text{Densité} \quad (3.2)$$

Où M = Poids avant l'essai
 m = poids après l'essai

On peut calculer la densité théorique d'un matériau composite avec l'équation suivante :

$$d = \frac{100}{\frac{\% \text{fibres}}{d_{\text{fibres}}} + \frac{\% \text{matrice}}{d_{\text{matrice}}} + \frac{\% \text{additifs}}{d_{\text{additifs}}}} \quad (3.3)$$

Idéalement, la densité théorique doit être comparée à la densité mesurée afin de déterminer le taux de porosité dans le composite puisque ce taux affecte considérablement la tenue mécanique du matériau. Cependant, la méthode de fabrication suivie dans ce travail était déjà validée par plusieurs chercheurs comme Mijiyawa et al [55], Bravo et al [78, 80, 108] et Gu et al [106] qui ont aussi fait leurs thèses de doctorat dessus.

Les poids morts sont placés sur le support de poids accroché au bout d'un levier avec un rapport de bras de levier de charge de 5 : 1, ainsi 10 N appliqués sur le support de poids applique une charge de 50 N sur l'échantillon. Le support de poids vide applique une charge de 42 N. La charge appliquée est donnée alors par l'équation 3.4 :

$$\text{Charge} = 42\text{N} + (5 \times (\text{charge appliquée en N})) \quad (3.4)$$

La distance totale de glissement est obtenue à partir de la mesure des révolutions totales du disque et la taille du disque est donnée à l'équation 3.5 :

$$\text{Distance totale de glissement} = 2 \times \pi (R_1 \omega_1 - R_2 \times \omega_2) \quad (3.5)$$

- **Réglage du taux de glissement**

La définition du taux de glissement est exprimée dans l'équation 3.6 :

$$\begin{aligned} \text{Taux de Glissement} &= \text{Vitesse de Glissement} / \text{Vitesse Principale} \\ &= (U_1 - U_2) / U_1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Différents taux de glissement sont obtenus en changeant la paire de pignons/engrenages ou en modifiant les diamètres des disques. Le taux de glissement est donné par l'équation 3.7 :

$$\text{Taux de Glissement \%} = 100 \times (R_1 \omega_1 - R_2 \omega_2) / R_1 \omega_1 \quad (3.7)$$

Où: R_1 = rayon du disque inférieur

R_2 = rayon du disque supérieur

ω_1 = Vitesse du disque inférieur (tr/min)

ω_2 = Vitesse du disque supérieur (tr/min)

A noter : $R_1 + R_2 = 60 \text{ mm}$

$$\omega_2 = \omega_1 \times (N_1 / N_2)$$

Où : N_1 = Nombre de dents du pignon inférieur

N_2 = Nombre de dents de la roue supérieur

- **Rapport entre les taux de glissement et de glissement/roulement**

Il est important de noter la différence entre le taux de glissement et le taux de glissement/roulement. La définition du taux de glissement/roulement est la suivante :

$$\text{Taux de glissement/roulement} = \text{vitesse de glissement} / \text{vitesse de roulement} \quad (3.8)$$

Ou : $\text{Vitesse de glissement} = |U_1 - U_2|$

$$\text{Vitesse de roulement} = \frac{1}{2} (U_1 + U_2)$$

Par conséquent :

$$\text{Taux de glissement/roulement \%} = 200 \times |U_1 - U_2| / (U_1 + U_2) \quad (3.9)$$

Avec U_1 et U_2 sont les vitesses des deux disques..Pour des disques de taille identiques, l'équation correspondante est :

$$\text{Taux de glissement/roulement \%} = 200 \times (1 - N_1/N_2) / (1 + N_1/N_2) \quad (3.10)$$

3.3.2.3 Plan d'expérience :

Les échantillons ont été nettoyés avant d'être testés pour éliminer tout débris de la surface de contact. Les échantillons de disque ont ensuite été remontés sur les arbres du tribomètre à double disque. Les essais ont été réalisés pour des vitesses de roulement de 200, 400, 500, 600

et 800 tr/min, pour une gamme de charges comprise entre 101 et 400 N, à des cycles de roulement de 4 heures avec des taux de glissement de 1.79%, 5.13%, 10.53%, 18.18% et 22.22% (voir tableau 10). Durant les tests, le processus d'usure a été observé de près et les données de frottement et d'usure ont été collectées par un système d'acquisition des données en ligne, enregistrées pour une récupération ultérieure et également affichées sur un écran d'ordinateur. L'affichage en temps réel était fait et les variations de la friction, l'usure et le coefficient de frottement étaient enregistrés chaque dix secondes durant tout le test. Après les tests, les échantillons ont ensuite été bien nettoyés à l'aide d'un jet d'air comprimé et pesés à l'aide d'une balance électronique de précision d'une marge d'erreur de 0.0001 g près pour déterminer la perte de masse. Un grand nombre de combinaisons de teneur de fibres, de vitesses et de charges ont été étudiées pour donner un large éventail de résultats. Les essais ont été répétés au moins trois fois. Le protocole expérimental pour ce genre de test cité dans les travaux antérieurs a été respecté à la lettre et les tests sont largement reproductibles.

Tableau 10 : Variables de fonctionnement testées

Facteur de contrôle	Niveaux					Unités
Taux massique de fibre	0	10	20	30	40	Wt.%
Charge	101	199	302	400		N
Vitesse de roulement	200	400	500	600	800	Tr/min
Taux de glissement	1.79	5.13	10.53	18.18	22.22	N/A

CHAPITRE 4 – RÉSULTATS ET ANALYSES

4.1 Comportement de tribologie– essai normalisé de tribologie :

Afin d'élucider le comportement à l'usure, une série de tests dans différentes conditions a été réalisée pour comprendre l'usure et le frottement du composite étudié à différentes teneurs de fibres (allant de 0% à 40% en poids du composite HDPE renforcé par des fibres de bouleau) sans lubrification externe.

4.1.1 Comportement à l'usure :

4.1.1.1 Effet du renforcement en fibres du composite :

Afin de déterminer le pourcentage optimal en masse de fibres de bouleau nécessaire pour renforcer le HDPE, des tests de roulement/glisement sur des disques de cinq pourcentages différents en masse de fibres ont été réalisés en appliquant une charge de 199N, roulant à 500 tr/min avec un taux de glissement de 22.22%. La figure 36 montre l'effet des fibres sur le taux d'usure du composite étudié dépendamment de la position du disque en fonctionnement.

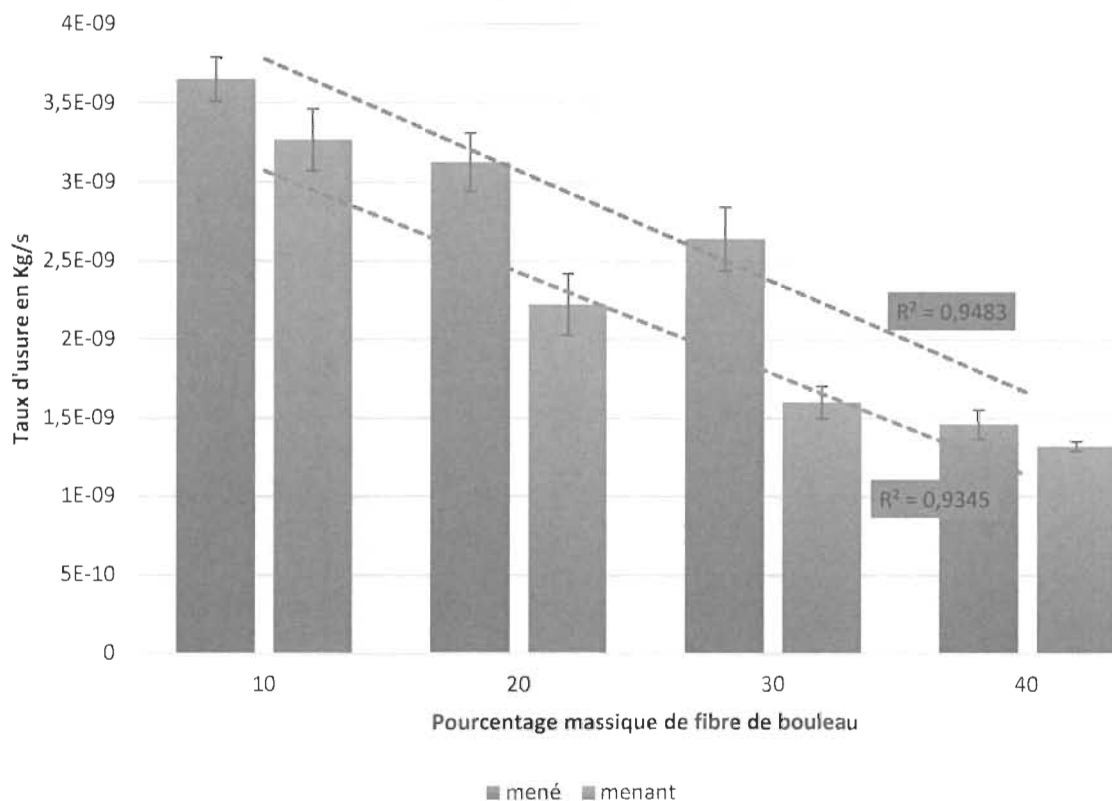


Figure 36 : Effet des fibres de bouleau sur le taux d'usure du composite HDPE/bouleau

Le taux d'usure diminue significativement avec l'augmentation du taux massique en fibres de bouleau. Il diminue de 15 %, 15.5% et 45% respectivement à 20%, 30% et 40% de fibre de bouleau pour les roues menées souvent plus affectées par l'usure. Ceci démontre une bonne compatibilité entre les fibres et la matrice.

Il est à noter que sous les mêmes conditions de test, les disques de HDPE pur (0 % en masse de fibres) ont été entièrement endommagés au bout de quelques cycles ce qui favorise l'idée de renforcement du matériau.

Il a été également observé que le taux d'usure a baissé de 15% pour un composite de 20 % en masse de fibres par rapport à celui à 10 % puis de 15.5% pour un passage de 20 % à 30% en masse de fibres. Ceci ne semble pas si important en comparaison avec une diminution beaucoup plus grande d'environ 45% pour un passage de 30 % à 40% en masse de fibres de

bouleau. Ces résultats confirment un rendement de tribologie optimal aux alentours de 40 % en masse de fibres. Ce comportement est lié aussi au taux de cristallinité élevé obtenu grâce aux conditions de moulage favorables [109, 110].

Partant de ces résultats et en se basant sur des travaux similaires issus de la littérature [8], il est à noter que tout le reste des tests mettant en évidence les effets des autres paramètres de fonctionnement sur la tribologie du composite HDPE/bouleau sera élucidé seulement à partir des échantillons de 40 % en masse de fibres de bouleau. Cette démarche va permettre de gagner beaucoup de temps durant les tests et de se concentrer sur le plus important. Toutefois, la justification de l'utilisation de ce pourcentage pour l'élaboration du reste de l'étude expérimentale va être vérifiée avec les engrenages.

4.1.1.2 Effet de la charge :

Les résultats obtenus ont permis de tracer la courbe du taux d'usure en fonction de différentes forces normales appliquées sur les disques testés (disques de 40 % en masse de fibres de bouleau) sur la figure 37. On peut voir que le taux d'usure varie avec la charge pour un nombre de cycles prédéfini. Le déroulement des essais a montré que pour un taux de glissement fixé à 22.22% et une vitesse de rotation de 500 tr/min, le taux d'usure augmente avec la charge appliquée.

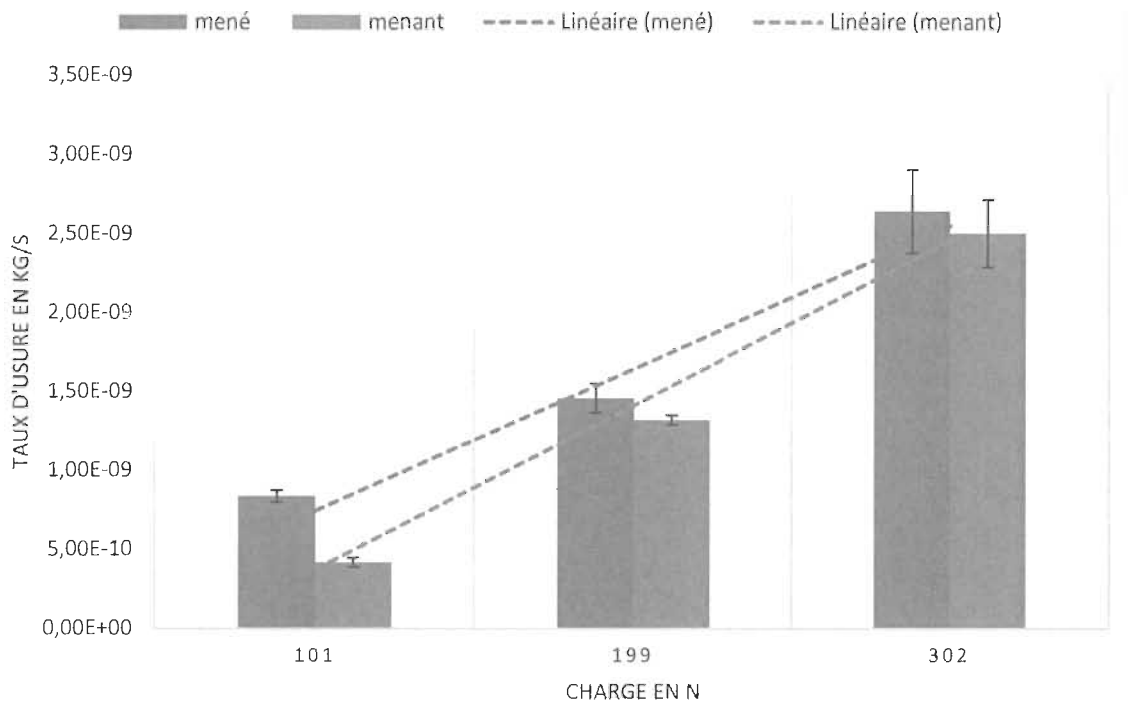


Figure 37 : Taux d'usure en fonction de la charge pour un taux de glissement de 22.22 % et une vitesse de rotation de 500 tr/min.

Les taux d'usure n'augmentent pas linéairement avec la charge contrairement à ce que l'on peut attendre de la loi d'usure d'Archard [111, 112]. Le changement était généralement un peu plus rapide lorsque la charge augmente. En effet, avec des disques testés au même taux de glissement et à la même vitesse de rotation mais à des charges de 400 N puis de 500 N, les résultats obtenus étaient plus critiques ; l'usure était plus sévère et l'endommagement total des pièces en rotation était aperçu après quelques minutes (environ 3000 cycles). Cela pourrait être dû en grande partie à une augmentation sévère de la température de surface (voir Figure 44) [108].

La figure 38 montre le pourcentage de perte de masse mesurée au cours des tests des différentes charges appliquées sous les mêmes conditions décrites auparavant :

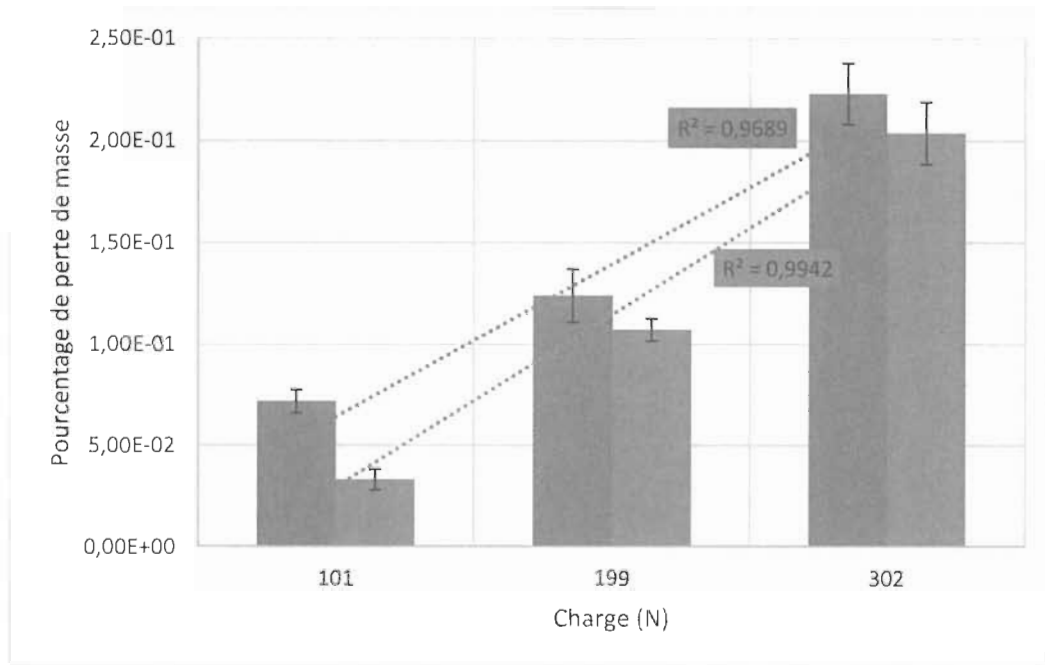


Figure 38 : Courbe du pourcentage de perte de masse (g) en fonction de la charge (N) pour un taux de glissement de 22.22% et une vitesse de rotation de 500 tr/min.

La quantité d'usure mesurée à différentes charges dépend en général de la position du disque en contact (mené ou menant). Ainsi, la roue menée paraît plus sensible à l'usure. Le pourcentage de perte de masse constaté sur les deux disques en contact augmente proportionnellement avec l'augmentation de la charge quelle que soit la position (menant ou mené).

Les résultats d'usure enregistrés en temps réel durant les tests mentionnés ci-dessus sont représentés par la figure 39. Ces courbes montrent l'évolution de l'usure de chaque test en fonction du nombre de cycles. Bien qu'elles soient importantes et représentatives dans cette étude, elles peuvent, cependant, être influencées par divers facteurs. Afin de mieux l'interpréter, il convient de préciser que le paramètre mesuré au cours du test par la machine est le déplacement vertical du disque supérieur (relié à l'arbre supérieur et au bloc de chargement) par rapport à sa position initiale et non l'usure en tant que telle. En d'autres termes, on mesure essentiellement la modification de la distance centrale entre les axes des deux disques. Par ailleurs, plus les disques s'usent, plus leurs axes se rapprochent l'un de l'autre sous l'effet de la

charge. Des fois, cette valeur peut être affectée par des phénomènes autre que l'usure. Ces phénomènes peuvent être :

- L'accumulation des débris dans la zone de contact qui force les éprouvettes à se séparer.
- L'expansion thermique causée par l'échauffement par frottement. Cette chaleur est dissipée par conduction et convection et provoque l'expansion des éprouvettes.
- Les erreurs de mesure qui peuvent être causées par une mauvaise réponse du LVDT ou par son niveau de sensibilité.

Les résultats de l'usure moyenne obtenus à partir de la perte de poids mesurée en plein milieu de quelques tests concordent étroitement avec les valeurs obtenues à partir de la pente de la courbe d'usure enregistrée en ligne, ce qui suggère que le taux d'usure était essentiellement constant tout au long des essais. La figure 39 illustre l'usure exprimée en μm , tracée pour trois charges différentes en fonction du nombre de cycles.

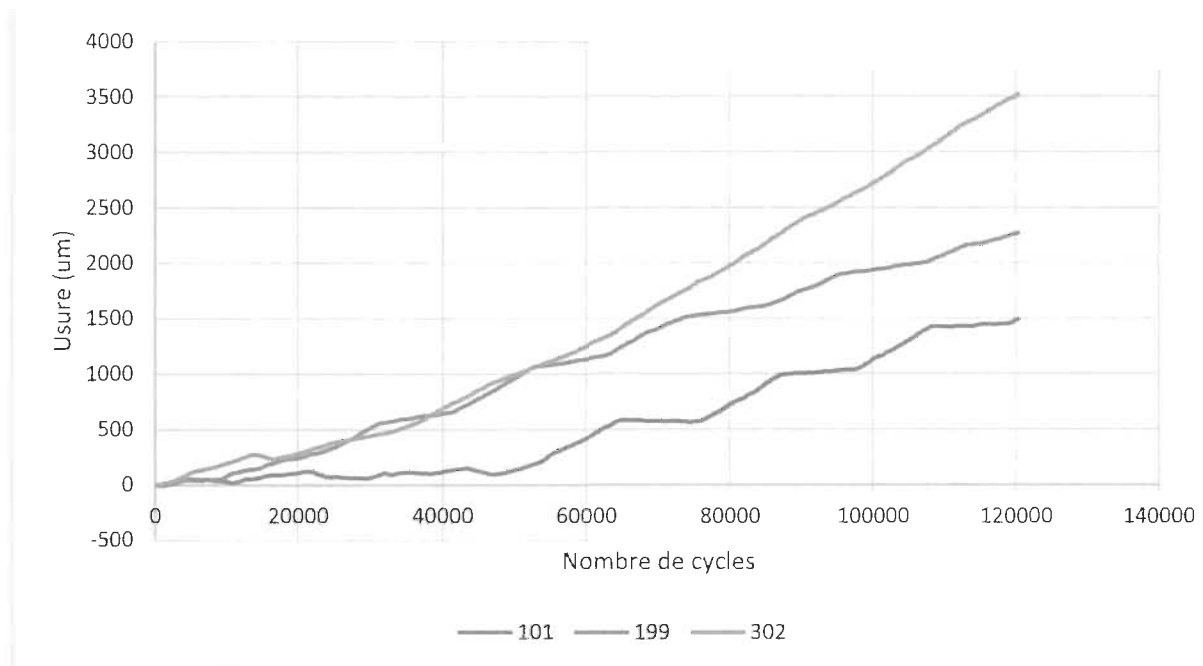


Figure 39 : Usure en fonction du nombre de cycles pour 3 charges différentes à 500tr/min et $T_g = 22.22\%$.

D'après les courbes des trois essais, l'usure était progressive au cours du temps. Peu de débris d'usure ont été générés et les surfaces de contact des deux disques semblaient devenir de plus en plus polies et brillantes. Cela est probablement dû à une modification de l'état de surface des disques en rotation et la disparition des aspérités (Voir figure 40).

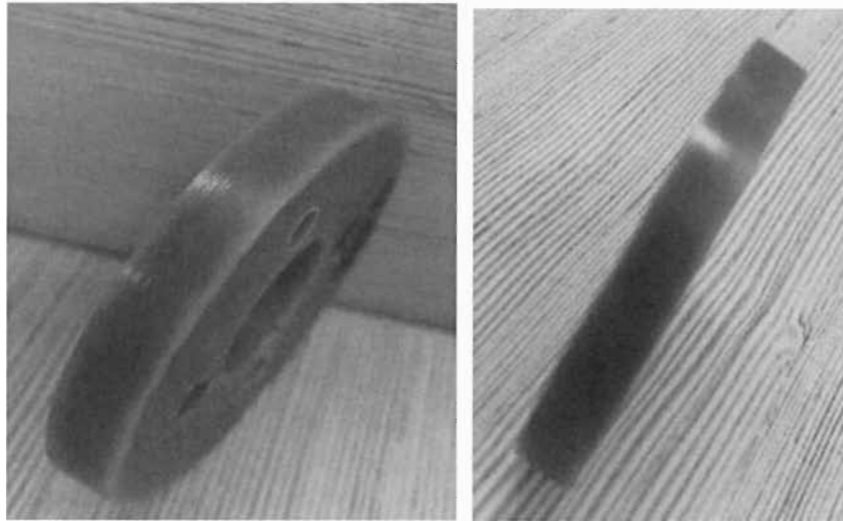


Figure 40 : Etat de surface des disques après l'essai.

4.1.1.3 Effet du taux de glissement :

Des résultats typiques de l'usure en fonction du nombre de cycles avec différents taux de glissements sont présentés à la figure 41. Ceux-ci sont obtenus à une vitesse de rotation de 500 tr/min et à une charge normale de 302 N.

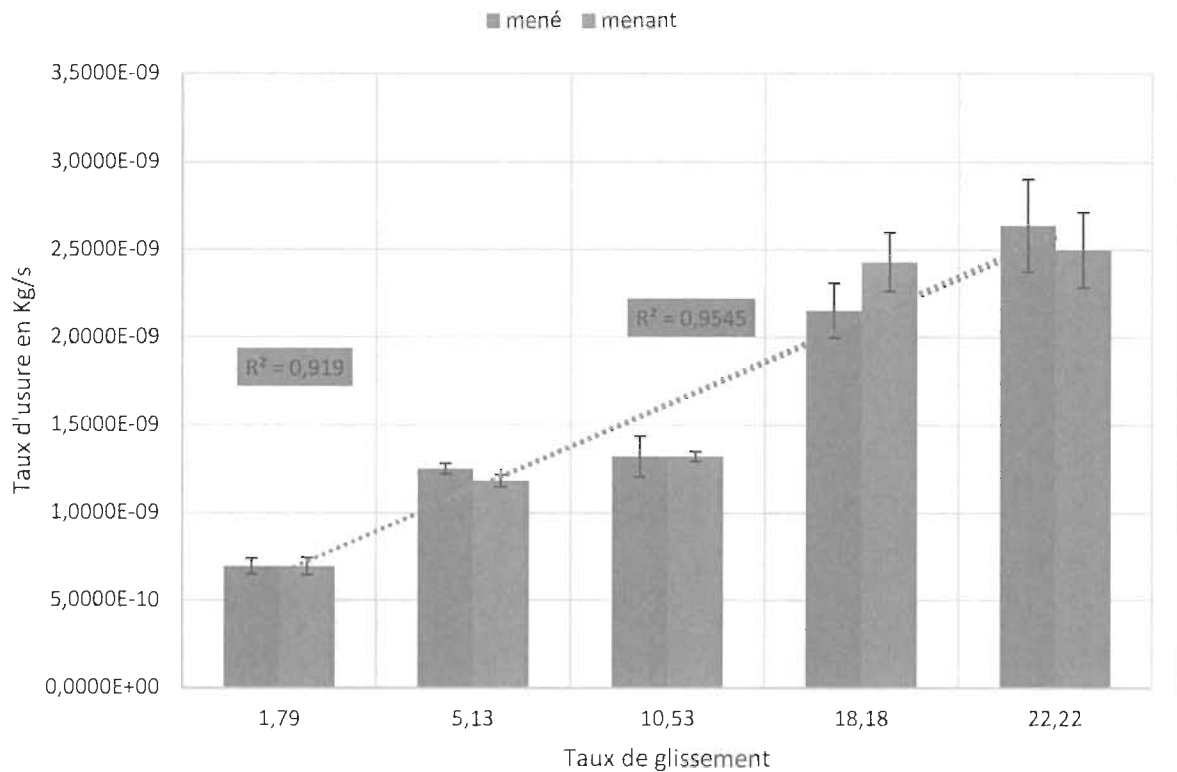


Figure 41 : Evolution du taux d'usure en fonction du taux de glissement pour une charge de 302N et une vitesse de 500tr/min.

On peut voir que le taux d'usure augmente considérablement avec l'augmentation du taux de glissement de 6.94×10^{-10} Kg/s avec un taux de glissement de 1.79% jusqu'à 2.64×10^{-9} Kg pour un taux de glissement de 22.22%.

4.1.1.4 Effet de la vitesse de rotation :

La figure 42 montre la variation du taux d'usure en fonction de la vitesse de rotation pour une charge de 302 N et un taux de glissement de 22.22 %. Il a été observé que la variation du taux d'usure n'a pas été aussi importante entre 200 tr/min et 400 tr/min comparativement à celle de 400 tr/min à 500 tr/min. En effet, l'augmentation du taux d'usure était de 30 % pour le double

de la vitesse mise initialement tandis que la variation était plus grande, soit de 35% de 400 tr/min à 500 tr/min.

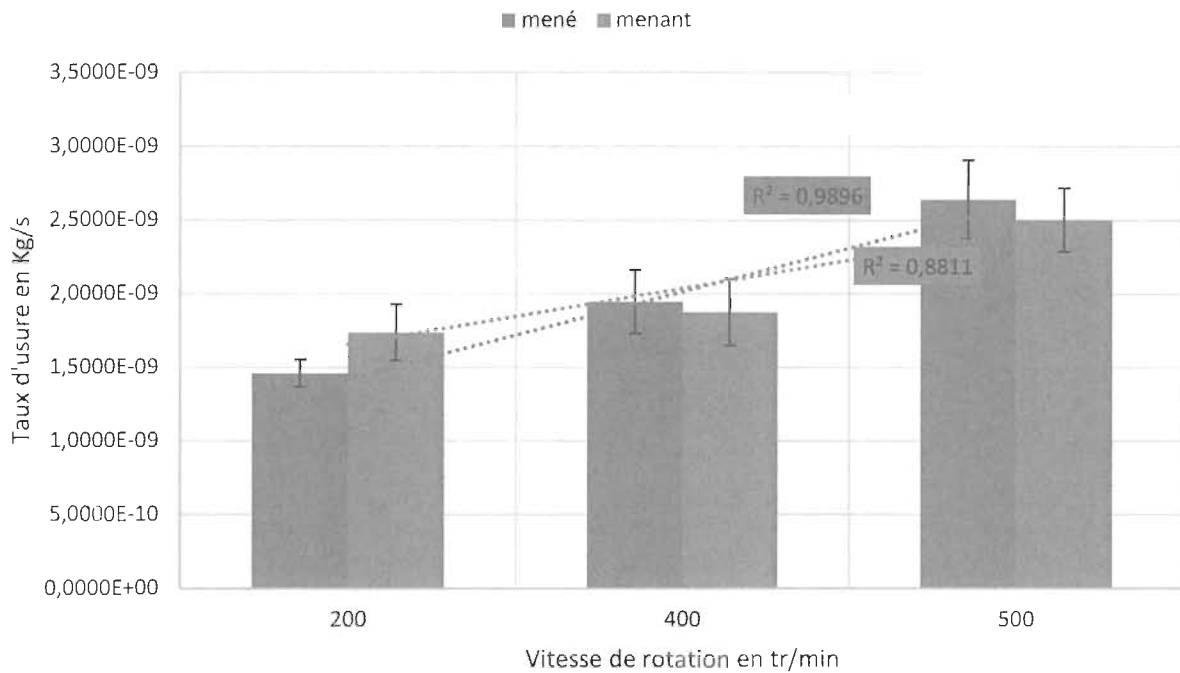


Figure 42 : Variation du taux d'usure en fonction de la vitesse de rotation pour une charge de 302N et un taux de glissement de 22.22%.

Des images des disques à la fin des essais sont présentées à la figure 43 montrant l'état de quelques disques. On peut observer que les échantillons sont en bon état démontrant une grande capacité à supporter les différentes conditions de charges et de vitesses appliquées.

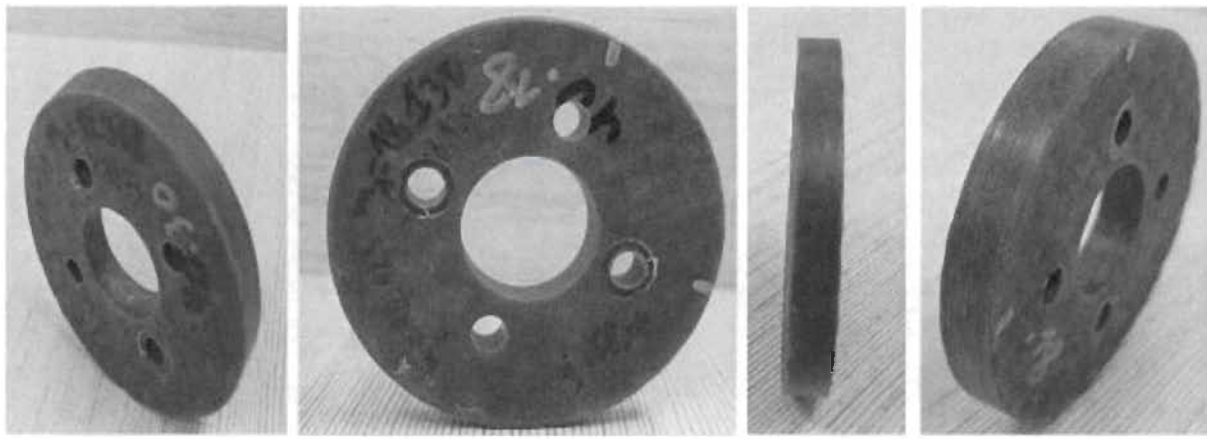


Figure 43 : Etat de quelques disques après le tests sous une charge de 302 N, un taux de glissement 22.22 % et une vitesse de rotation 500 tr/min.

Des essais ont été menés dans les mêmes conditions pour une vitesse de 600 tr/min puis de 800 tr/min, mais l'usure n'était pas rapportée sur le graphique pour ces deux gammes de vitesses à cause de l'apparition de formes plus sévères d'endommagement ce qui a empêché la continuation des tests au bout de quelques centaines de cycles de marche (Voir la figure 44).

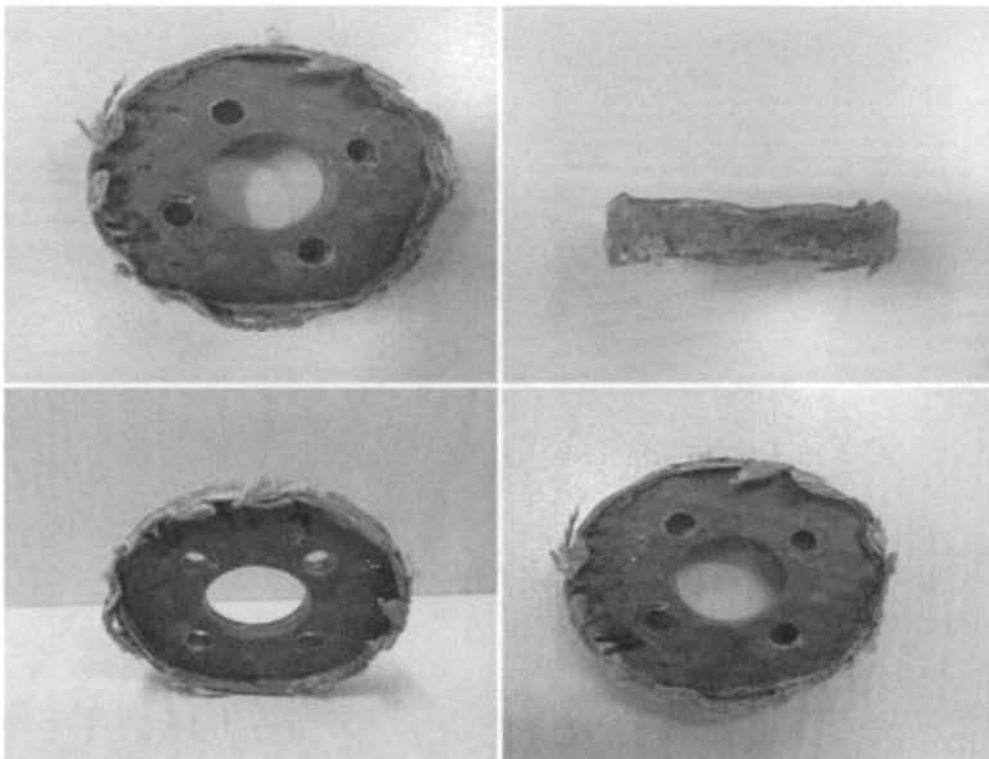


Figure 44 : Etat d'endommagement de l'échantillon testé à 800tr/min pour une charge de 302 N et taux de glissement de 22.22 %.

4.1.2 Comportement du frottement et du coefficient de frottement μ

La force de frottement a été obtenue lors des tests en mesurant en continu la force de glissement tangentielle sur le disque supérieur (disque mené) à l'aide d'un capteur de déplacement. Le coefficient de frottement a été calculé comme la force de frottement divisée par la charge normale. Il a également été enregistré pendant les essais.

4.1.2.1 Effet du renforcement en fibres du composite :

La figure 44 montre l'effet des différents teneurs de fibres sur la force de frottement du composite étudié. La force de frottement maximale est apparue lorsque la teneur en fibre de bouleau était la plus faible (10% en masse) et a ensuite commencé à diminuer. En ajoutant plus de fibres de bouleau au composite, le coefficient de frottement diminuait.

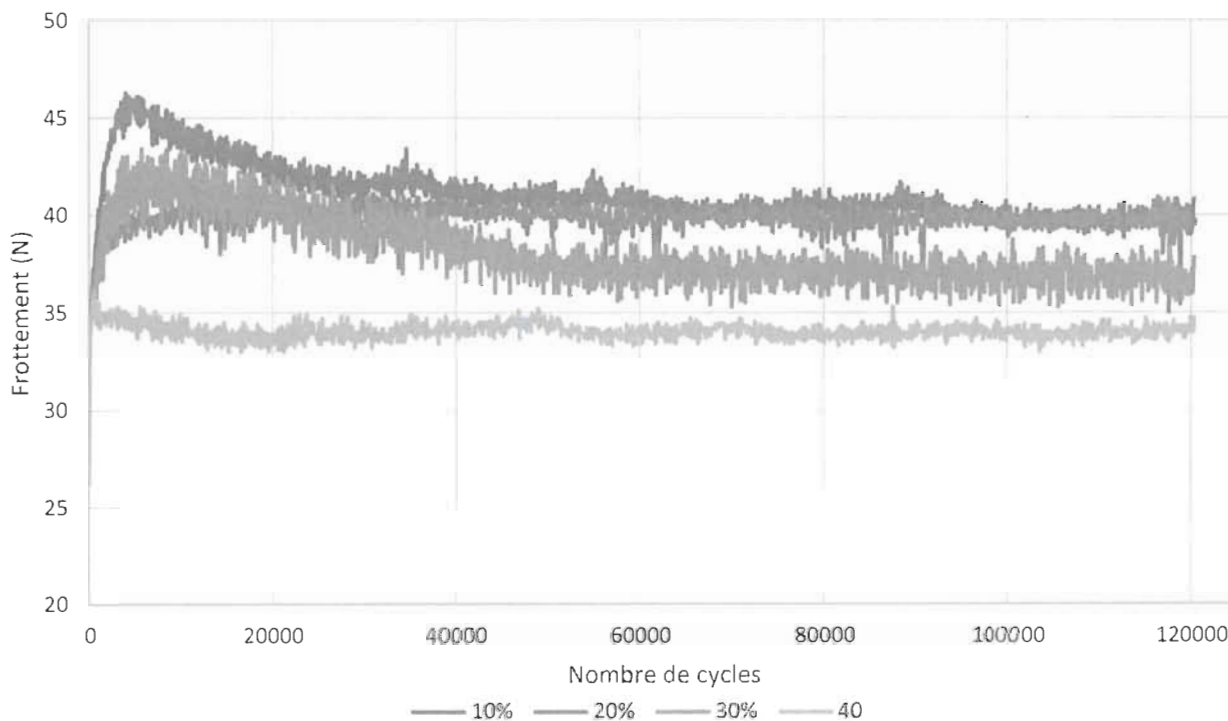


Figure 45 : L'influence du taux de renforcement sur le frottement du composite HDPE/bouleau.

Les graphiques peuvent également être divisés en deux grandes régions : une région initiale très courte durant laquelle on constate une hausse rapide de la force de frottement ainsi que des valeurs maximales de frottement comparées au reste de données enregistrées. Cette variation peut être expliquée par le fait d'être une période de « rodage ». Par la suite, on remarque une diminution de la friction suivie par une stabilisation de la force de frottement jusqu'à la fin de l'essai.

Les coefficients de frottement moyens ont été calculés pour l'ensemble des résultats de frottement. Les valeurs pour les échantillons de 10 %, 20 %, 30 % et 40 % en masse de fibres étaient respectivement de l'ordre de 0.2, 0.2, 0.19 et 0.17. La figure 46 représente l'effet de la composition sur le coefficient de frottement.

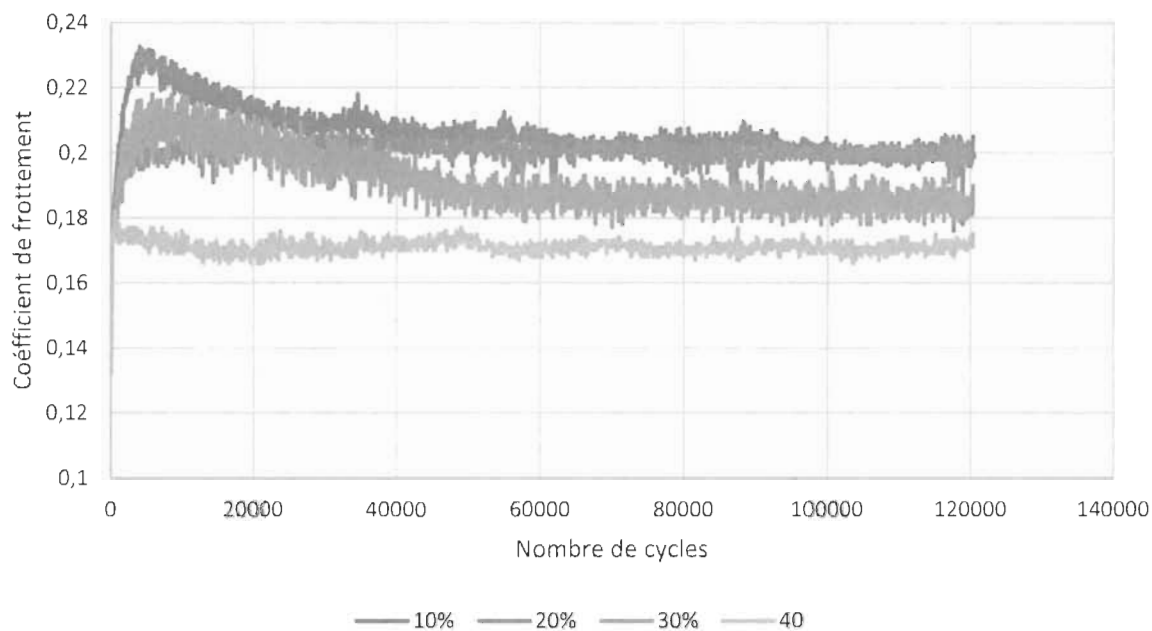


Figure 46 : Effet de la teneur en fibre de bouleau sur le coefficient de frottement du composite.

Les résultats montrent que tous les types d'échantillons ont des valeurs de coefficients de frottement proches entre elles variant à peu près entre 0.17 et 0.2, ce qui pourrait être approximé à 0.2 sur le plan pratique.

4.1.2.2 Effet de la charge :

La figure 47 montre l'évolution de la force de frottement en fonction de la charge pour une vitesse de rotation de 500 tr/min et un taux de glissement de 22.22%. L'allure des courbes décrites par le frottement à trois charges différentes semble la même à un écart près. En effet, au début de chaque essai, on remarque une petite hausse de la force de frottement atteignant des valeurs maximales de frottement suivie d'une stabilisation jusqu'à la fin du test.

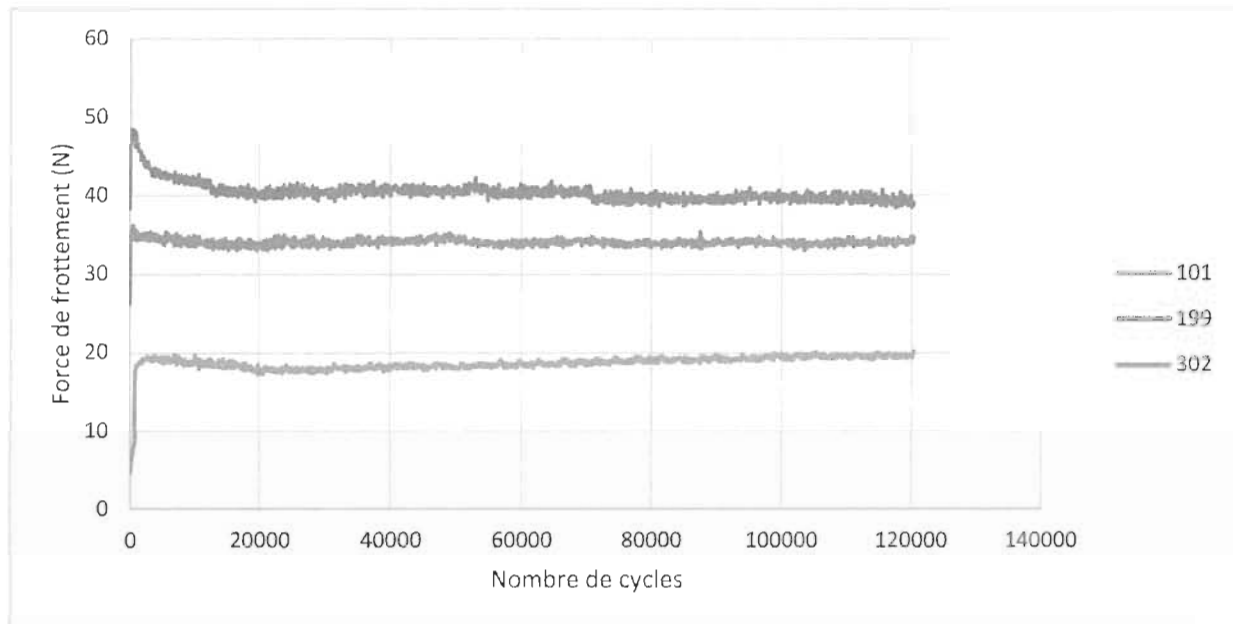


Figure 47 : Influence de la charge sur le frottement pour une vitesse de 500 tr/min et un taux de glissement de 22.22 %.

D'après ces résultats, il apparaît que certains des matériaux testés présentent une transition assez marquée de la force de frottement, généralement associée aux processus de rodage. Ces processus peuvent inclure l'aplatissement ou l'élimination de grandes aspérités, la réalisation de l'équilibre thermique conduisant à la stabilisation des propriétés mécaniques des surfaces [89]. Naturellement, les courbes décrivant le coefficient de frottement sous l'effet des charges appliquées suivent en allure celles de la force de frottement comme le montre la figure 48.

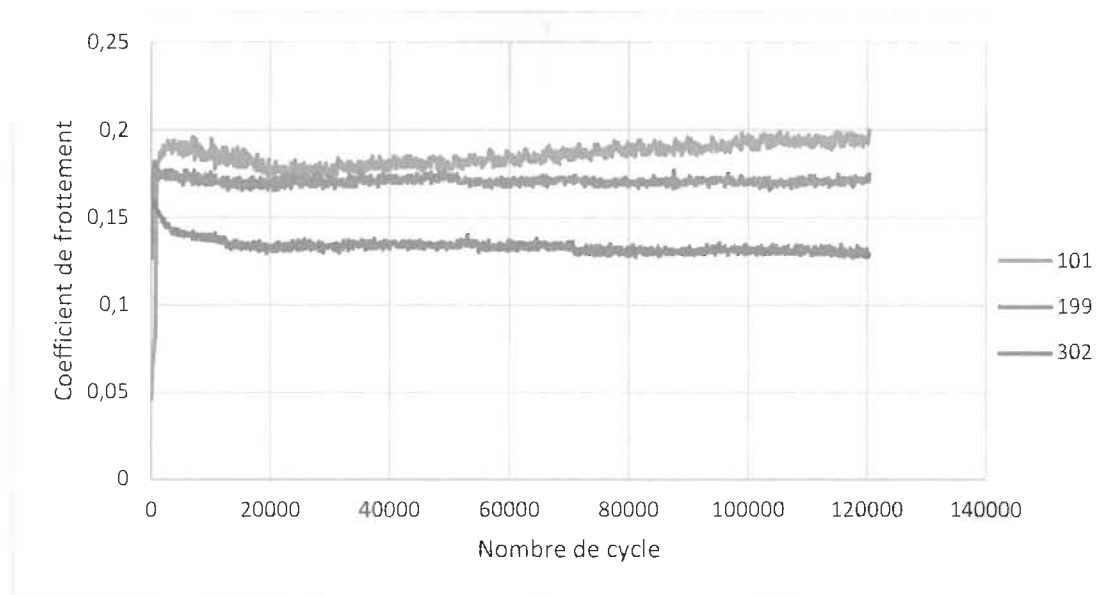


Figure 48 : Influence de la charge appliquée sur le coefficient de frottement.

Contrairement à la force de frottement, le coefficient de frottement tend à diminuer avec l'augmentation de la charge. Ceci peut être dû à l'amélioration de l'état de surface des disques en contact et l'enlèvement des aspérités sous des charges relativement importantes. La hausse de température engendrée par les grandes forces de frottement entraîne également un changement géométrique ainsi le polissage des surfaces en contact ce qui influence le coefficient de frottement.

Les coefficients de frottement moyens ont été calculés pour l'ensemble des résultats de frottement, y compris pour les deux régions. Comme récapitulatif, la variation du coefficient de frottement en fonction de la charge sous les conditions auparavant mentionnées est représentée à la figure 49.

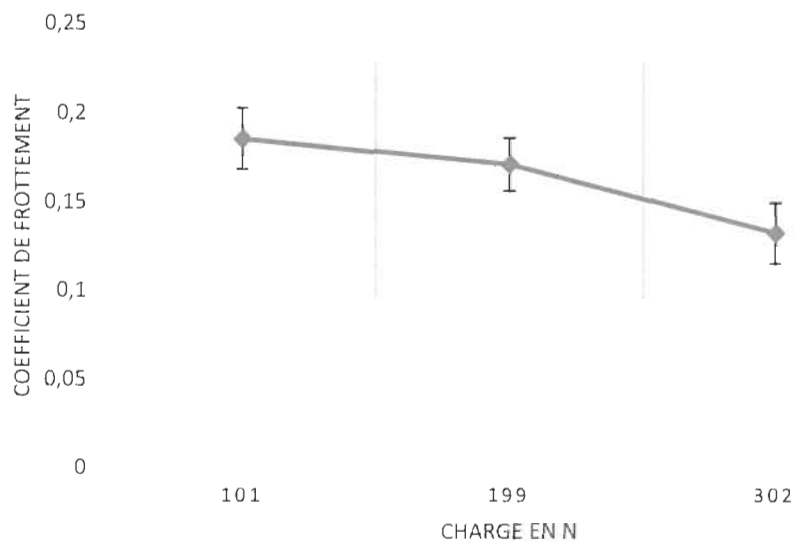


Figure 49 : Courbe du coefficient de frottement en fonction de la charge.

4.1.2.3 Effet de la vitesse de rotation :

La courbe décrivant le coefficient de frottement pour une charge de 302 N et un taux de glissement de 22.22 % en fonction des vitesses de rotation est présentée dans la figure 50.

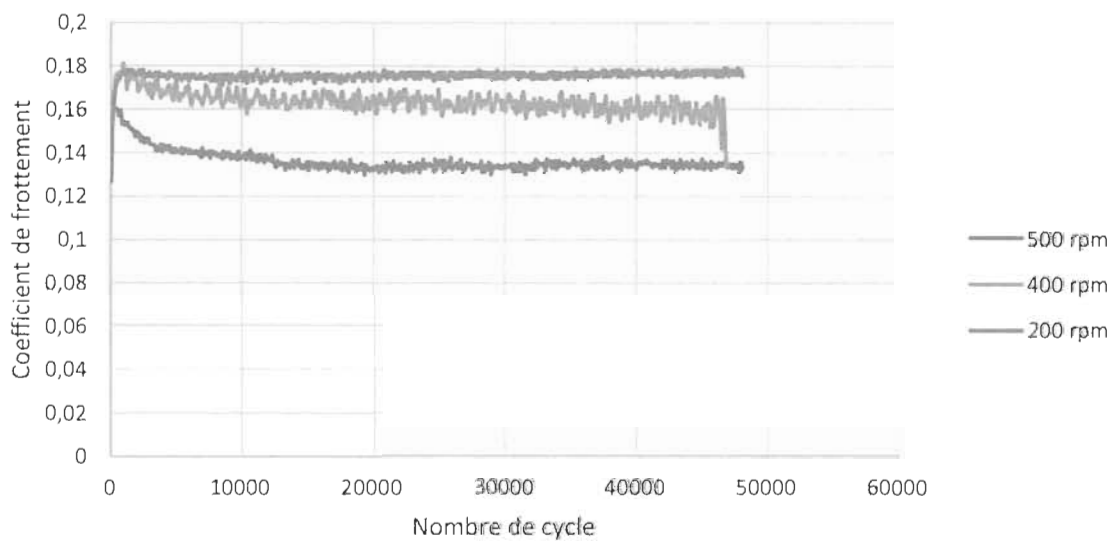


Figure 50 : Variation du coefficient de frottement pour des vitesses différentes à une charge de 302 N et un taux de glissement de 22.22 %.

L'influence de la vitesse de rotation sur le coefficient de frottement pour une charge appliquée de 302 N et un taux de glissement de 22.22% est présentée dans la figure 51.



Figure 51 : Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de rotation pour une charge de 302 N et un taux de glissement de 22.22 %.

Il est observé que le coefficient de frottement a diminué avec l'augmentation de vitesse de rotation. En effet, pour des vitesses relativement faibles (200 tr/min, 400tr/min), le coefficient de frottement était important comparé à celui issu du test effectué à 500tr/min. Il baisse de 0.164 pour 400 tr/min à 0.132 pour 500tr/min soit de 28% de sa valeur. La réduction de ce paramètre est majoritairement due à la hausse de température de contact à des vitesses élevées ce qui engendre un polissement des surfaces en contact.

4.2 Comportement de tribologie - essais sur banc d'engrenages :

Avant de présenter les résultats obtenus des essais sur les engrenages, il est primordial de rappeler que l'usure des engrenages d'essai est une combinaison de l'usure, de la déformation

élastique de divers composants du support, de la déformation viscoélastique des engrenages d'essai, de la rotation relative des engrenages d'essai par rapport à leur corps moulé, les axes en acier et toute modification dimensionnelle des engrenages d'essai due à l'absorption ou à la perte d'humidité et à la dilatation thermique. Il convient également de rappeler que, du fait de la nature de la géométrie de l'engrenage cylindrique, tout mouvement relatif mesuré est effectivement dû à un changement géométrique, quelle qu'en soit la cause, sur la ligne de d'action. Vu que l'estimation des erreurs paraît compliquée, les résultats collectés provenaient d'un minimum de trois tests par matériau. Ces résultats sont représentatifs et correspondent à ce qui se fait pour les essais d'usure.

4.2.1 Effet de la teneur en fibres naturelles :

Afin d'illustrer l'effet de la composition en fibres du composite sur les performances de tribologie, beaucoup d'essais ont été effectués balayant une large gamme de vitesses de rotation et de couples appliquées. Il a été constaté que, pour tous les essais effectués, le pourcentage en fibres a une grande influence sur le comportement à l'usure des composites. Indépendamment de la valeur imposée des paramètres de fonctionnement décrite auparavant (vitesse, charge), le taux d'usure diminue avec l'augmentation du pourcentage en fibres du composite. Les résultats obtenus à partir des tests effectués avec différentes teneurs de fibres dans les engrenages pour un exemple de vitesse de rotation de 500 tr/min et un couple appliqué de 4 N.m sont présentés à la figure 52.

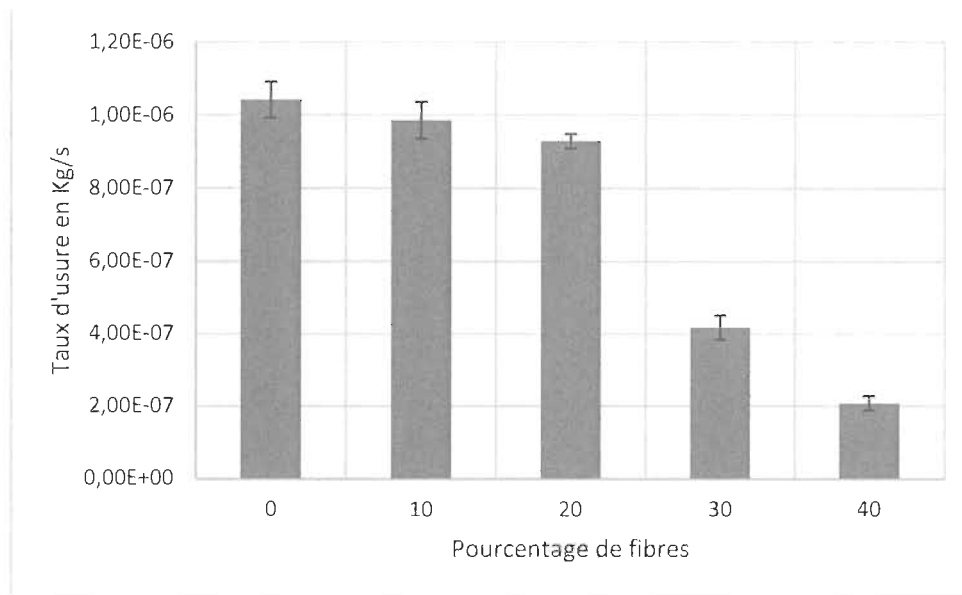


Figure 52 : Influence de la teneur en fibre sur l'usure des engrenages pour une vitesse de 500 tr/min et un couple de 4 N.m.

Comme observé, l'usure exprimée en gramme de masse perdue a chuté de 80 % de sa valeur pour un engrenage non renforcé par rapport à un engrenage de 40% en masse en fibres de bouleau.

4.2.2 Influence des paramètres de fonctionnement sur l'usure des engrenages

Etant donné que le taux massique de fibres qui sera utilisé est clairement le plus haut (40 %), les résultats des essais valorisant l'influence des paramètres de fonctionnement des engrenages seront focalisés sur cette gamme d'engrenages. Le graphique de la figure 53 présente l'effet de la vitesse de rotation ainsi que le couple appliqué sur l'usure exprimé en pourcentage de masse perdue sur l'engrenage mené.

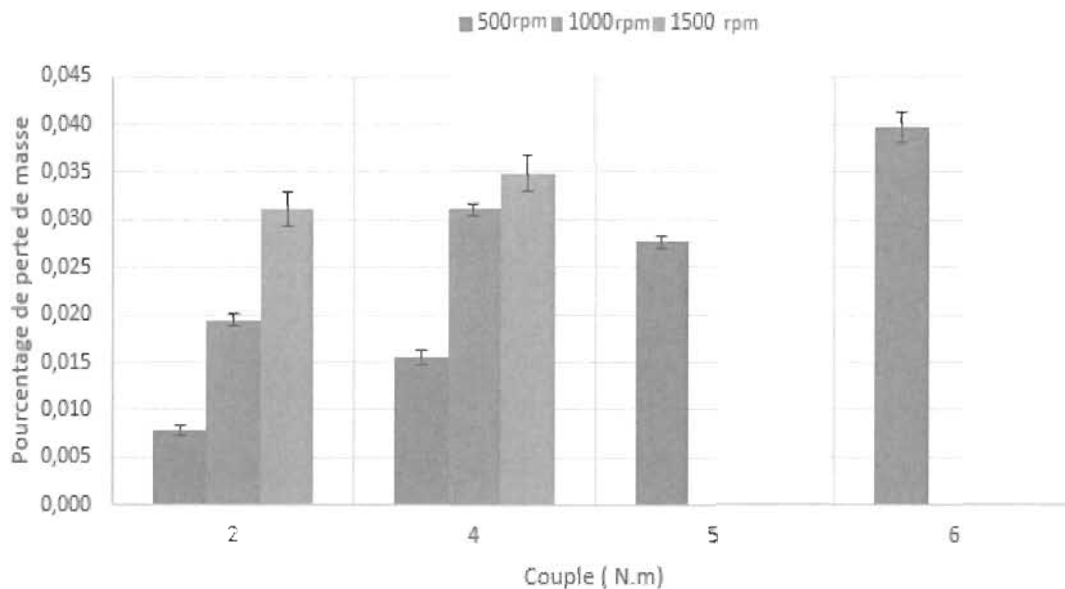


Figure 53 : Comparatif de l'usure en fonction du couple appliqué sur des engrenages de 40% en masse de fibres de bouleau à différentes vitesses.

Il a été observé que le pourcentage de perte de masse augmente considérablement en augmentant le couple appliqué pour la même vitesse de rotation. En effet, pour une vitesse de rotation de 500 tr/min, la perte de masse passe de 0.008 % de la masse initiale pour un couple appliqué de 2 N.m à 0.016 % pour le double du couple soit 4 N.m et à 0.04 % pour 6 N.m. Ainsi, l'augmentation de la valeur du pourcentage de masse perdue était multipliée par cinq pour une valeur de couple passant de 2N.m à 6 N.m. On observe aussi que pour une valeur de couple appliqué de 2 N.m, le pourcentage de masse perdue a été multiplié à peu près par 2 (0.019 %) pour une vitesse de rotation de 1000 tr/min puis par 4 (0.031 %) testé en 1500 tr/min. Il convient de noter que les engrenages représentant des taux de 40% en masse de fibres ont également été testés dans les mêmes conditions pour des couples de 5 N.m et 6 N.m à des vitesses de rotation de 1000 tr/min et 1500 tr/min, mais tous les engrenages ont échoué en raison de la fatigue à la racine de la dent bien avant la fin de la durée prédéterminée du test.

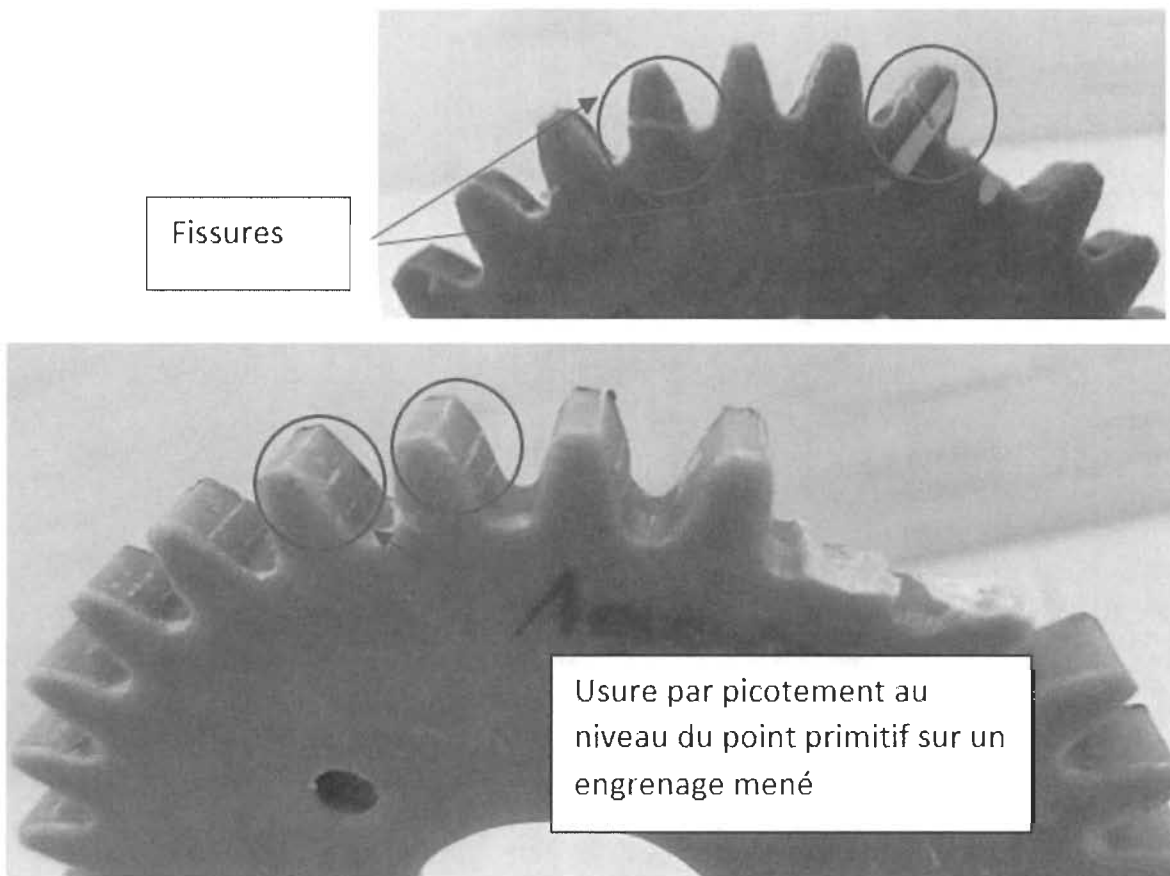


Figure 54 : Photos de formes d'endommagement des engrenages.

4.3 Comparaison des données sur les deux types de tests :

La comparaison des taux d'usure dans les travaux à double disque avec les tests des engrenages ne sera jamais vraiment représentative, car les accélérations du glissement, la flexibilité des dents et les différences de cycle thermique rendent les conditions de contact très différentes. Cependant, compte tenu de ces différences, soumettre un matériau à des conditions nominale- ment similaires devrait révéler des tendances similaires dans le comportement à l'usure et éventuellement une corrélation de l'ordre de grandeur du taux d'usure et par conséquent, la comparaison du taux d'usure des éprouvettes et le rendement des engrenages.

Parmi les essais effectués, on a extrait ceux qui ont été faits dans les mêmes conditions de tests en appliquant les mêmes valeurs des paramètres utilisés. L'allure du taux d'usure en

fonction d'une plage commune de charges appliquées à une vitesse de rotation de 500 tr/min est présentée à la figure 54.

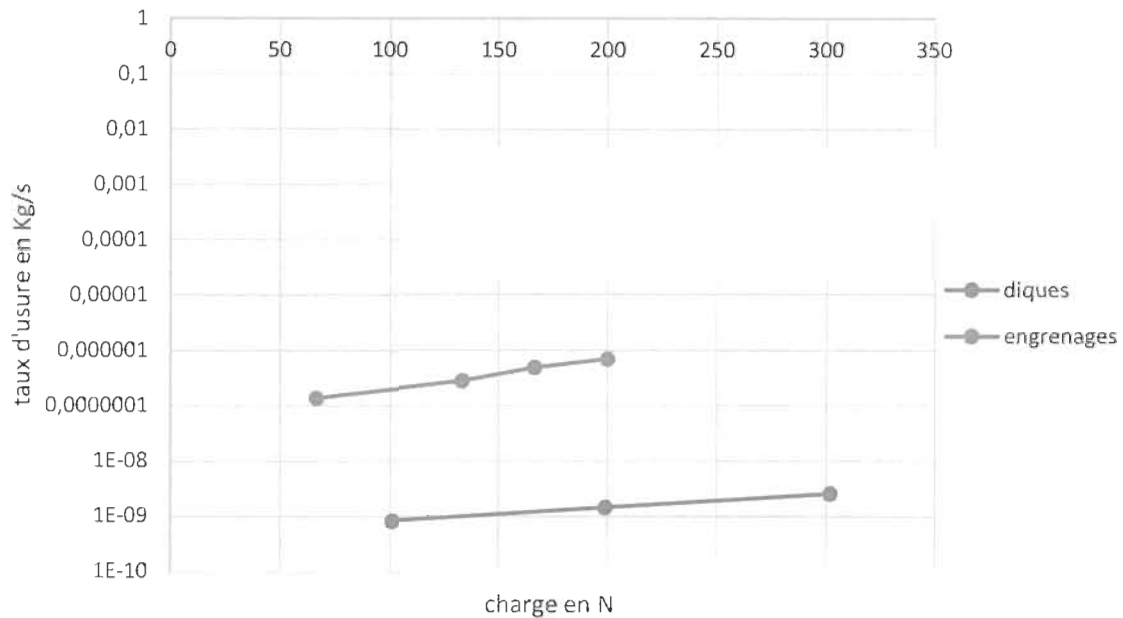


Figure 55 : Comparatif du taux d'usure en fonction de la charge entre les disques et les engrenages.

Bien que la tendance soit semblable, le taux d'usure des engrenages est beaucoup plus élevé comparativement aux disques. Pour la même vitesse de roulement de 500 tr/min et une charge de 200 N, le taux d'usure mesuré sur le disque est de 1.46×10^{-9} Kg/s tandis que celui relevé du même test sur l'engrenage était de l'ordre de 6.94×10^{-7} Kg/s.

Il est un peu surprenant que le taux d'usure des disques soit inférieur à celui des engrenages testés dans les mêmes conditions, mais plusieurs explications peuvent être attribuées à ce comparatif de comportement. En effet, les conditions de glissement sont assez différentes : Les tests sur le tribomètre sont caractérisés par un état de roulement/glissement stationnaire continu sur une surface de contact plus importante (les disques sont de 10 mm de largeur). Ceci permet une répartition plus uniforme de la charge, donc une diminution de l'amplitude de la force appliquée par élément de surface d'où une usure plus régulière et moins prononcée. De plus, le taux de glissement maximal qui peut être simulé par la machine utilisée

est limité à 22.22 % ce qui ne représente pas la valeur maximale atteinte par les dents des engrenages. Ainsi, le contact des engrenages est caractérisé par de grandes accélérations de glissement surtout sur les bouts des flancs là où le taux de glissement peut dépasser les 30 % dépendamment de la géométrie de l'engrenage. Outre cela, les modifications brusques de la force appliquée sur les dents dues au partage de charge et les effets complexes de déviation des dents ont certainement empiré l'usure.

4.4 Effet de la température :

Le profil de la température moyenne pour le test de double disques à un taux de glissement de 22.22%, une charge de 200 N et une vitesse de rotation de 500 tr/min est tracé sur le même graphe avec celui d'un système d'engrenages roulant sous une charge de 200 N et une vitesse de rotation de 500 tr/min et est reporté sur la figure 56.

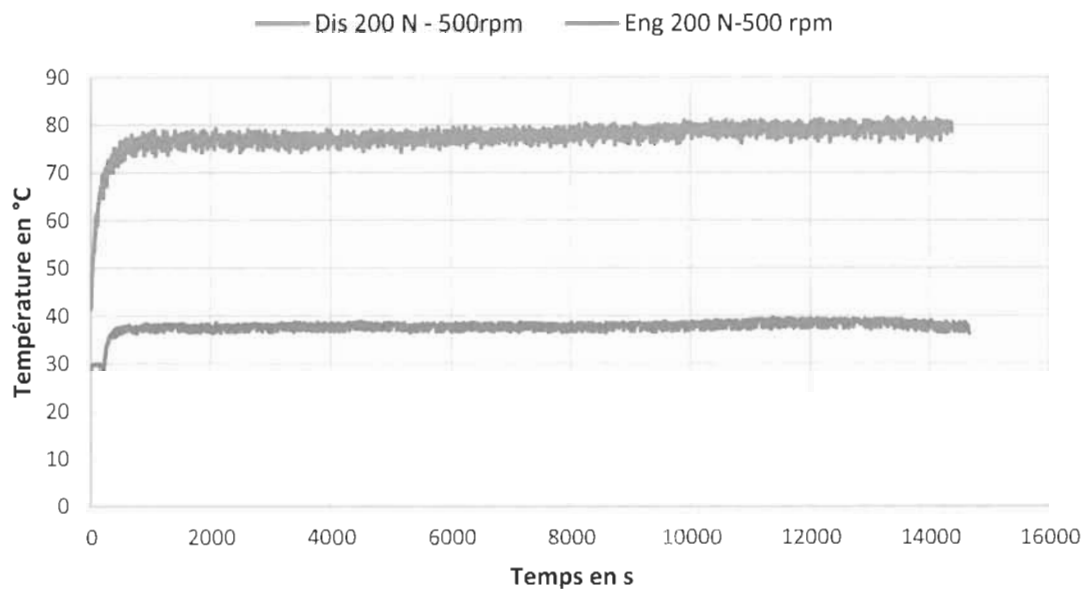


Figure 56 : Comparatif entre la température d'un système d'engrenages et de disques testés aux mêmes conditions.

On peut voir que la température moyenne maximale des disques est aux alentours de 80°C tandis que la température moyenne du système d'engrenages est presque la moitié (40°C). La hausse de température au début des deux tests est beaucoup plus aigüe pour les disques et se produit presque dans la même marge de temps que celle des engrenages.

La basse température mesurée sur les engrenages en fonctionnement est causée par un effet de refroidissement dû à la circulation de l'air. Ceci est basé sur le phénomène connu lorsque l'engrènement passe de deux dents en un contact à une seule dent, de l'air est piégé entre les dents et que son explosion soudaine après le contact produit un effet de refroidissement qui réduit instantanément la température de surface.

Les températures instantanées lors des tests d'engrenages et de disques roulant au mêmes conditions sont montrées dans la figure 57.

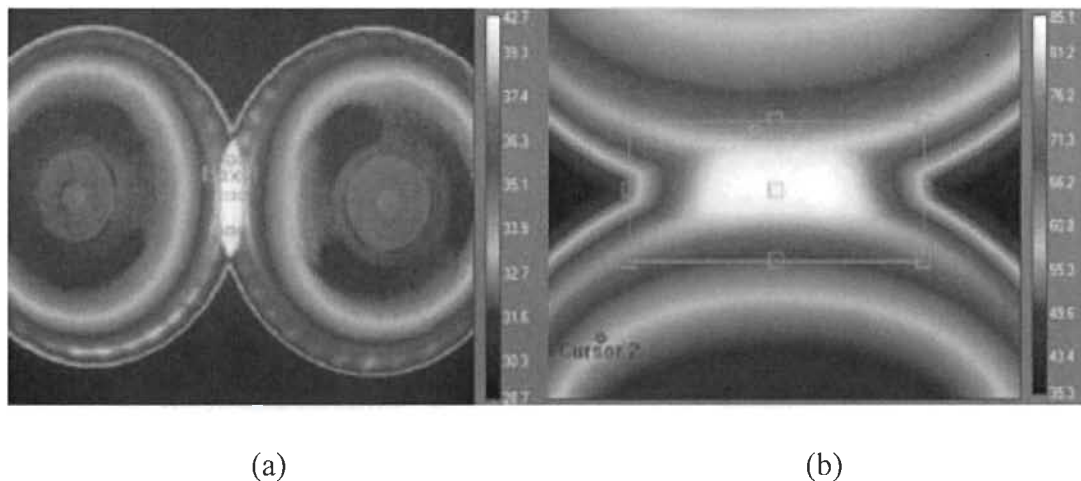


Figure 57 : Profil de température infrarouge instantanée pour deux tests fonctionnant dans les mêmes conditions (a) engrenages et (b) disques.

Il importe de noter que les valeurs de température recueillies ne sont qu'approximatives. La résolution de la caméra infrarouge disponible ne permet pas de donner les températures réelles mais donne de bonnes tendances.

Pour tenter de relier plus étroitement l'évolution du taux d'usure et du coefficient de frottement avec le taux de glissement, on a superposé les courbes de température des différents essais variant le taux de glissement à une charge de 200 N et une vitesse de rotation de 500 tr/min (Voir figure 58).

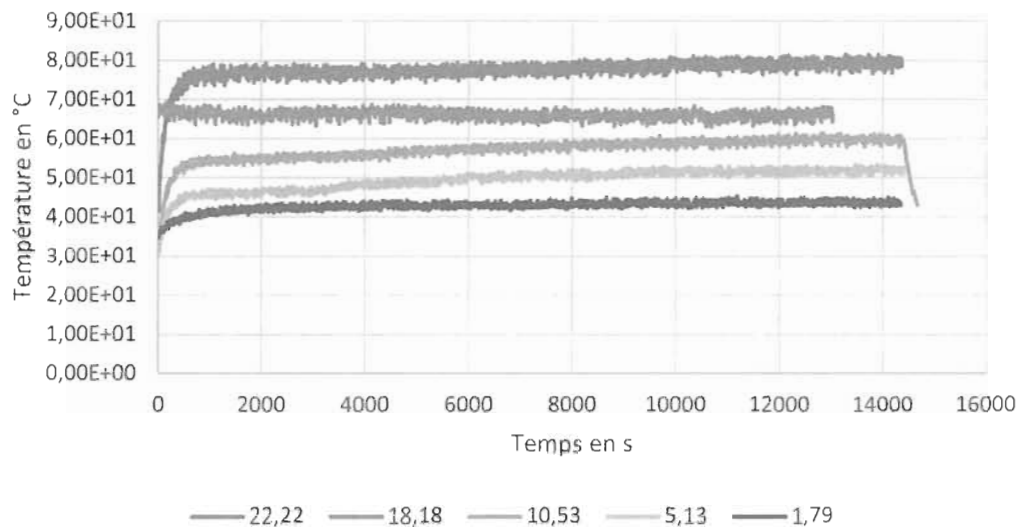


Figure 58 : Température de surface au point de contact en fonction du temps pour différents taux de glissement à une charge de 200 N et une vitesse de 500 tr/min.

La variation de la température au cours des essais respecte à peu près la même allure : on remarque une hausse rapide de la température jusqu'à un certain seuil où elle se stabilise jusqu'à la fin de l'essai. On remarque également que l'allure des courbes de température est étroitement semblable à celle de la force de frottement. Les valeurs atteintes au seuil des différentes courbes de température sont respectivement proportionnelles à celles des taux de glissement. Ceci est plus clair à la figure 59 qui représente l'effet du taux de glissement sur la température moyenne pour une charge de 200 N et une vitesse de rotation de 500 tr/min.

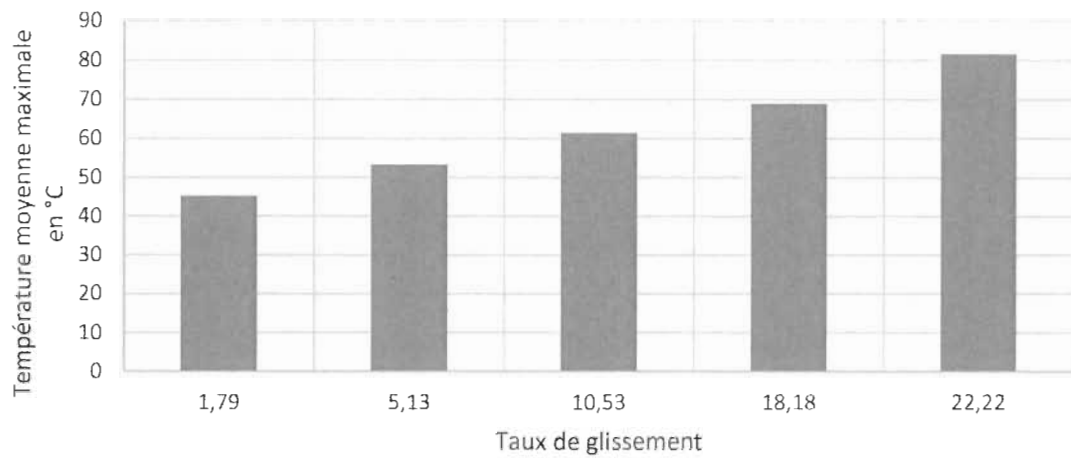


Figure 59 : Effet du taux de glissement sur la température moyenne maximale pour une charge de 200 N et une vitesse de rotation de 500 tr/min.

La température moyenne maximale augmente avec l'augmentation du taux de glissement jusqu'à une valeur proche de 20 % au-delà de laquelle la valeur de la température augmente légèrement et la température moyenne maximale commence à être relativement haute. Il convient de noter que la température pour les tests effectués sur des disques à des vitesses et charges élevées qui ont échoué après quelques centaines de cycles, a connu une élévation rapide atteignant 100 à 110°C. Ces cas n'ont pas servis pour le calcul.

5.1 Récapitulation :

Les préoccupations environnementales sont à l'origine de la demande de matériaux biodégradables tel que les composites polymères renforcés de fibres naturelles. Ces composites remplacent rapidement les matériaux conventionnels dans plusieurs secteurs où le frottement et l'usure sont deux facteurs indispensables. Durant cette étude, les performances de tribologie du composite polyéthylène à haute densité renforcé par des fibres de bouleau jaune ont été étudiées à l'aide d'un ensemble d'essais normalisés de tribologie sur un tribomètre TE 53 « PLINT PARTNER ». L'effet de la fraction massique des fibres, la charge, la vitesse de roulement/glisement sur le comportement de tribologie sont rapportés avec une visualisation de la température.

L'incorporation des fibres de bouleau au matériau en HDPE renforce les capacités de résistance à l'usure du composite. Comparé au HDPE net, le taux d'usure du composite avec fibres de bouleau est beaucoup plus bas. En outre, le traitement des fibres par ajout d'un agent de couplage (MAPE) est un facteur très important pour la fabrication du composite, car il est responsable de l'amélioration des propriétés de tribologie en établissant de bonnes liaisons interfaciales entre les fibres et la matrice. L'augmentation du pourcentage de fibre diminue considérablement le taux d'usure allant du composite non renforcé jusqu'à 40% en masse totale de fibre qui semble être le pourcentage massique optimal de fibre en terme de performances de tribologie du composite.

Il a été constaté que le taux d'usure était significativement affecté par les conditions de fonctionnement, en particulier la charge et le taux de glissement. Il semble que l'augmentation de la charge entraîne une augmentation du taux d'usure, le comportement global étant similaire

à celui observé lorsque le taux de glissement était augmenté et aussi pour la variation de la vitesse de rotation.

La transition vers une usure sévère semble se produire lorsque la puissance de friction introduite au contact augmente la température de surface maximale au-dessus de 110 ° C environ, là où le matériau devient considérablement plus mou ce qui provoque l'échouement. Dans la zone d'usure sévère, la surface atteint le point de fusion du matériau, le taux d'usure augmente encore avec une défaillance superficielle extrêmement rapide et de larges plaques de la surface peuvent se détacher.

5.2 Conclusion :

La méthodologie utilisée a permis d'avoir des informations pertinentes et détaillées sur les taux d'usure des engrenages en fonction de la composition du matériau ainsi que les paramètres de fonctionnement (la charge, la vitesse de roulement/glissement, le taux du glissement). Cela a permis aussi une comparaison entre les résultats des deux types de tests. La corrélation entre les résultats des essais à double disque et ceux effectués sur les engrenages n'est pas particulièrement la meilleure, avec des taux d'usure largement différents. Le comportement à l'usure des disques correspond en allure à celui trouvé dans les tests d'engrenage et semble présenter des mécanismes d'usure similaires. Cependant les taux d'usure mesurés étaient beaucoup plus grands sur les disques.

Globalement, les disques HDPE/40%.m de bouleau étaient capables de fonctionner à des taux de glissement faibles pour des charges faibles et moyennes et à une vitesse de rotation de 500tr/min ou moins. Leurs performances diminuent surtout avec une augmentation du taux de glissement. L'application de ce composite en engrenage semble suivre la même loi.

Lors de la détermination des propriétés tribo-mécaniques du composite, la prise en compte de l'ensemble des hétérogénéités constitue une tâche insurmontable vu

l'incompatibilité naturelle des matériaux. L'optimisation de ces résultats est conjointe à l'amélioration du procédé de fabrication des échantillons puisque la géométrie et la précision de la composition des échantillons que ce soit des disques ou des engrenages joue un rôle très important dans la caractérisation des performances de tribologie. Il a été démontré que la réduction de la charge et du taux de glissements contribuait à réduire la température générée et ses effets associés le long de la ligne de contact. Ainsi, la possibilité d'optimiser la géométrie de la dent de l'engrenage en polymère afin de réduire le coefficient de glissement loin du point de contact augmentera potentiellement la durée de vie et réduira l'occurrence des mécanismes d'usure montrés dans les tests de coefficient de glissement élevé.

Une alternative de la méthode de fabrication est d'utiliser le moulage par injection qui représente la principale méthode de mise en forme des pièces en plastique renforcé [113]. En effet, les hautes pressions utilisées pendant le moulage par injection garantissent une bonne finition de surface. Ainsi, l'orientation des fibres semble être idéale au pied de la dent et sur les flancs, ce qui semble être avantageux surtout que l'orientation des fibres est l'un des facteurs pouvant affecter le comportement à l'usure et au frottement [114].

De Plus, les techniques de visualisation de précision des surfaces comme les images tridimensionnelles à haute résolution produites par le microscope électronique à balayage fournissent des informations topographiques, morphologiques et de composition plus précises et permettent d'analyser les faciès d'usure et identifier les modes d'usure ainsi que l'effet de la variation de chaque paramètre mis en jeu dans cette étude sur le mode d'endommagement, ce qui les rends inestimables dans le cas d'une telle étude.

5.3 Recommandations pour travaux futurs et perspectives

Pour la suite des travaux, nous recommandons les activités suivantes :

- Etablir le lien entre les résultats obtenus par les tests analytiques normalisés de tribologie et l'usure, la perte de couple sur les engrenages en fonctionnement.

- Effectuer les calculs appropriés pour obtenir des résultats du taux d'usure selon Archard pour les éprouvettes et pour les engrenages afin de les comparer.

- Effectuer des mesures de température presque instantanée des dents des roues d'engrenages avec une caméra thermique infra-rouge de haute précision pour avoir des valeurs plus proches du réel des dents.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Ticoalu, T. Aravinthan, and F. Cardona, "A review of current development in natural fiber composites for structural and infrastructure applications." pp. 113-117.
- [2] M. Jawaid, and H. P. S. Abdul Khalil, "Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review," *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, no. 1, pp. 1-18, 2011.
- [3] P. Joseph, G. Mathew, K. Joseph, G. Groeninckx, and S. Thomas, "Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, no. 3, pp. 275-290, 2003.
- [4] V. Rao, P. Ashokan, and M. Shridhar, "Studies of dielectric relaxation and ac conductivity in cellulose acetate hydrogen phthalate-poly (methyl methacrylate) blends," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 281, no. 1-2, pp. 213-220, 2000.
- [5] I. Vroman, and L. Tighzert, "Biodegradable polymers," *Materials*, vol. 2, no. 2, pp. 307-344, 2009.
- [6] G. J.Y, "La fibre de flax dans le monde du câble," *ACOME*, décembre 2009, 2009.
- [7] d. I. F. e. d. P. Ministère des Forêts. "Bouleau Jaune," <https://mffp.gouv.qc.ca/>.
- [8] F. MIJIYAWA, "Formulation, Caractérisation, Modélisation et Prédiction du Comportement Thermomécanique des Pièces Plastiques et Composite de Fibre de Bois : Application aux Engrenages," Génie mécanique, Université du Québec à Trois Rivières, Trois Rivières, 2018.
- [9] S. V. Joshi, L. Drzal, A. Mohanty, and S. Arora, "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?," *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, vol. 35, no. 3, pp. 371-376, 2004.
- [10] S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora, "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 3, pp. 371-376, 2004.
- [11] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552-1596, 2012.
- [12] A. Shalwan, and B. Yousif, "In state of art: mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres," *Materials & Design*, vol. 48, pp. 14-24, 2013.
- [13] N. Uddin, *Developments in fiber-reinforced polymer (FRP) composites for civil engineering*: Elsevier, 2013.
- [14] N. Graupner, A. S. Herrmann, and J. Müssig, "Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly (lactic acid)(PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 6-7, pp. 810-821, 2009.
- [15] D. Dai, and M. Fan, "Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications," *Natural Fibre Composites*, pp. 3-65: Elsevier, 2014.
- [16] A. A. El-Sayed, M. G. El-Sherbiny, A. S. Abo-El-Ezz, and G. A. Aggag, "Friction and wear properties of polymeric composite materials for bearing applications," *Wear*, vol. 184, no. 1, pp. 45-53, 1995.
- [17] D. G. Hepworth, J. F. V. Vincent, G. Jeronimidis, and D. M. Bruce, "Penetration of epoxy resin into plant fibre cell walls increases the stiffness of plant fibre composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 6, pp. 599-601, 2000.

- [18] A. S. Virk, W. Hall, and J. Summerscales, "Failure strain as the key design criterion for fracture of natural fibre composites," *Composites Science and Technology*, vol. 70, no. 6, pp. 995-999, 2010.
- [19] A. Alawar, A. M. Hamed, and K. Al-Kaabi, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement," *Composites Part B: Engineering*, vol. 40, no. 7, pp. 601-606, 2009.
- [20] N. Chand, and U. K. Dwivedi, "High stress abrasive wear study on bamboo," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 183, no. 2-3, pp. 155-159, 2007.
- [21] P. Saha, S. Manna, S. R. Chowdhury, R. Sen, D. Roy, and B. Adhikari, "Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 9, pp. 3182-3187, 2010.
- [22] M. F. Rosa, B. s. Chiou, E. S. Medeiros, D. F. Wood, T. G. Williams, L. H. C. Mattoso, W. J. Orts, and S. H. Imam, "Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene vinyl alcohol copolymers/coir biocomposites," *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 21, pp. 5196-5202, 2009.
- [23] C. W. Chin, and B. F. Yousif, "Potential of kenaf fibres as reinforcement for tribological applications," *Wear*, vol. 267, no. 9-10, pp. 1550-1557, 2009.
- [24] B. F. Yousif, and H. Ku, "Suitability of using coir fiber/polymeric composite for the design of liquid storage tanks," *Materials and Design*, vol. 36, pp. 847-853, 2012.
- [25] B. F. Yousif, S. T. W. Lau, and S. McWilliam, "Polyester composite based on betelnut fibre for tribological applications," *Tribology International*, vol. 43, no. 1-2, pp. 503-511, 2010.
- [26] H. L. Bos, *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials*: Technische Universiteit Eindhoven Eindhoven, 2004.
- [27] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, "Natural fibers, biopolymers, and biocomposites," 2005.
- [28] S. Monteiro, K. Satyanarayana, A. Ferreira, D. Nascimento, F. Lopes, I. Silva, A. Bevitori, W. Inácio, J. Bravo Neto, and T. Portela, "Selection of high strength natural fibers," *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 15, no. 4, pp. 488-505, 2010.
- [29] F. M. Al-Oqla, and S. Sapuan, "Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 347-354, 2014.
- [30] A. Mohanty, M. A. Khan, and G. Hinrichsen, "Surface modification of jute and its influence on performance of biodegradable jute-fabric/Biopol composites," *Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 7, pp. 1115-1124, 2000.
- [31] N. El-Tayeb, "A study on the potential of sugarcane fibers/polyester composite for tribological applications," *Wear*, vol. 265, no. 1-2, pp. 223-235, 2008.
- [32] T. B. Yallew, P. Kumar, and I. Singh, "Sliding Wear Properties of Jute Fabric Reinforced Polypropylene Composites," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 402-411, 2014.
- [33] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop, and M. Trada, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 856-873, 2011.
- [34] P. T. R. Swain, and S. Biswas, "Abrasive Wear Behaviour of Surface Modified Jute Fiber Reinforced Epoxy Composites," *Materials Research*, vol. 20, no. 3, pp. 661-674, 2017.
- [35] K. B. Krishnan, I. Doraiswamy, and K. P. Chellamani, "2 - Jute A2 - Franck, Robert E," *Bast and Other Plant Fibres*, pp. 24-93: Woodhead Publishing, 2005.

- [36] A. Shalwan, and B. F. Yousif, "In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres," *Materials & Design*, vol. 48, pp. 14-24, 2013.
- [37] S. Hashmi, U. Dwivedi, and N. Chand, "Graphite modified cotton fibre reinforced polyester composites under sliding wear conditions," *Wear*, vol. 262, no. 11-12, pp. 1426-1432, 2007.
- [38] A. Eleiche, and G. Amin, "The effect of unidirectional cotton fibre reinforcement on the friction and wear characteristics of polyester," *Wear*, vol. 112, no. 1, pp. 67-78, 1986.
- [39] V. G. P. N. Vijaya Kumar, K. Srikanth, "Evaluation of Wear Properties of Jute Reinforced," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, no. 11, 2014.
- [40] J. Meredith, R. Ebsworth, S. R. Coles, B. M. Wood, and K. Kirwan, "Natural fibre composite energy absorption structures," *Composites Science and Technology*, vol. 72, no. 2, pp. 211-217, 2012.
- [41] D. Plackett, T. L. Andersen, W. B. Pedersen, and L. Nielsen, "Biodegradable composites based on L-poly lactide and jute fibres," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 9, pp. 1287-1296, 2003.
- [42] B. H. Lee, H. J. Kim, and W. R. Yu, "Fabrication of long and discontinuous natural fiber reinforced polypropylene biocomposites and their mechanical properties," *Fibers and Polymers*, vol. 10, no. 1, pp. 83-90, 2009.
- [43] N. Chand, and U. K. Dwivedi, "Sliding wear and friction characteristics of sisal fibre reinforced polyester composites: Effect of silane coupling agent and applied load," *Polymer Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 280-284, 2008.
- [44] P. V. Joseph, K. Joseph, and S. Thomas, "Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites," *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 11, pp. 1625-1640, 1999.
- [45] H. Ismail, A. Rusli, and A. A. Rashid, "Maleated natural rubber as a coupling agent for paper sludge filled natural rubber composites," *Polymer Testing*, vol. 24, no. 7, pp. 856-862, 2005.
- [46] M. J. John, B. Francis, K. Varughese, and S. Thomas, "Effect of chemical modification on properties of hybrid fiber biocomposites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 2, pp. 352-363, 2008.
- [47] 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.
- [48] M. Kabir, H. Wang, K. Lau, and F. Cardona, "Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 2883-2892, 2012.
- [49] A. Valadez-Gonzalez, J. M. Cervantes-Uc, R. Olayo, and P. J. Herrera-Franco, "Chemical modification of henequen fibers with an organosilane coupling agent," *Composites Part B: Engineering*, vol. 30, no. 3, pp. 321-331, 1999.
- [50] N. Chand, and U. K. Dwivedi, "Effect of coupling agent on abrasive wear behaviour of chopped jute fibre-reinforced polypropylene composites," *Wear*, vol. 261, no. 10, pp. 1057-1063, 2006.
- [51] B. F. Yousif, and N. S. M. El-Tayeb, "Adhesive wear performance of T-OPRP and UT-OPRP composites," *Tribology Letters*, vol. 32, no. 3, pp. 199-208, 2008.
- [52] P. K. Bajpai, I. Singh, and J. Madaan, "Tribological behavior of natural fiber reinforced PLA composites," *Wear*, vol. 297, no. 1-2, pp. 829-840, 2013.

- [53] N. Singh Gill, and B. Yousif, "Wear and frictional performance of betelnut fibre-reinforced polyester composite," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 223, no. 2, pp. 183-194, 2009.
- [54] S. Mohanty, S. Verma, and S. Nayak, "Dynamic mechanical and thermal properties of MAPE treated jute/HDPE composites," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 3-4, pp. 538-547, 2006.
- [55] F. Mijiyawa, D. Koffi, B. V. Kokta, and F. Erchiqui, "Formulation and tensile characterization of wood-plastic composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 28, no. 12, pp. 1675-1692, 2014.
- [56] S. Shinoj, R. Visvanathan, S. Panigrahi, and M. Kochubabu, "Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review," *Industrial Crops and products*, vol. 33, no. 1, pp. 7-22, 2011.
- [57] S. S. Ray, and M. Bousmina, "Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: in greening the 21st century materials world," *Progress in materials science*, vol. 50, no. 8, pp. 962-1079, 2005.
- [58] Y. Pan, and Z. Zhong, "A micromechanical model for the mechanical degradation of natural fiber reinforced composites induced by moisture absorption," *Mechanics of Materials*, vol. 85, pp. 7-15, 2015.
- [59] M. J. John, and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites," *Carbohydrate polymers*, vol. 71, no. 3, pp. 343-364, 2008.
- [60] M. George, P. G. Mussone, Z. Abboud, and D. C. Bressler, "Characterization of chemically and enzymatically treated hemp fibres using atomic force microscopy and spectroscopy," *Applied Surface Science*, vol. 314, pp. 1019-1025, 2014.
- [61] B. F. Yousif, "Frictional and wear performance of polyester composites based on coir fibres," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 223, no. 1, pp. 51-59, 2009.
- [62] K. Tanaka, and Y. Yamada, "Influence of counterface roughness on the friction and wear of polytetrafluorethylene-and polyacetal-based composites," *Journal of Synthetic Lubrication*, vol. 5, no. 2, pp. 115-131, 1988.
- [63] K. Tanaka, Y. Uchiyama, and S. Toyooka, "The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene," *Wear*, vol. 23, no. 2, pp. 153-172, 1973.
- [64] K. Tanaka, "Friction and Wear of Glass and Carbon Fiber-Filled Thermoplastic Polymers," *Journal of Lubrication Technology*, vol. 99, no. 4, pp. 408-414, 1977.
- [65] M. Clerico, "Tribological behaviour of polyacetals," *Wear*, vol. 64, no. 2, pp. 259-272, 1980.
- [66] J. K. Lancaster, "Polymer-based bearing materials: the role of fillers and fibre reinforcement," *Tribology*, vol. 5, no. 6, pp. 249-255, 1972.
- [67] J. Lancaster, "Estimation of the limiting PV relationships for thermoplastic bearing materials," *Tribology*, vol. 4, no. 2, pp. 82-86, 1971.
- [68] F. Kennedy, S. Cullen, and J. Leroy, "Contact temperature and its effects in an oscillatory sliding contact," *Journal of tribology*, vol. 111, no. 1, pp. 63-69, 1989.
- [69] K. Friedrich, *Advances in composite tribology*: Elsevier, 2012.
- [70] 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.
- [71] S. Senthilvelan, and R. Gnanamoorthy, "Damage mechanisms in injection molded unreinforced, glass and carbon reinforced nylon 66 spur gears," *Applied composite materials*, vol. 11, no. 6, pp. 377-397, 2004.
- [72] K. Mao, W. Li, C. J. Hooke, and D. Walton, "Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears," *Wear*, vol. 267, no. 1, pp. 639-645, 2009.

- [73] K. Mao, "A new approach for polymer composite gear design," *Wear*, vol. 262, no. 3-4, pp. 432-441, 2007.
- [74] 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.
- [75] T. J. Hoskins, K. D. Dearn, Y. K. Chen, and S. N. Kukureka, "The wear of PEEK in rolling-sliding contact – Simulation of polymer gear applications," *Wear*, vol. 309, no. 1, pp. 35-42, 2014.
- [76] D. Koffi, A. Bravo, L. Toubal, and F. Erchiqui, "Optimized use of cooling holes to decrease the amount of thermal damage on a plastic gear tooth," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 5, 2016.
- [77] D. Koffi, "Etude du comportement thermique des engrenages cylindriques droits en plastique," Département de génie mécanique, Ecole polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, 1987.
- [78] A. Bravo, D. Koffi, L. Toubal, and F. Erchiqui, "Life and damage mode modeling applied to plastic gears," *Engineering Failure Analysis*, vol. 58, pp. 113-133, 2015.
- [79] A. Bravo, L. Toubal, D. Koffi, and F. Erchiqui, "Development of novel green and biocomposite materials: Tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 66, pp. 16-28, 2015.
- [80] A. Bravo, L. Toubal, D. Koffi, and F. Erchiqui, "Gear fatigue life and thermomechanical behavior of novel green and bio-composite materials VS high-performance thermoplastics," *Polymer Testing*, 2017.
- [81] D. Koffi, R. Gauvin, and H. Yelle, "Heat generation in thermoplastic spur gears," *Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design*, vol. 107, no. 1, pp. 31-37, 1985.
- [82] C. J. Hooke, S. N. Kukureka, P. Liao, M. Rao, and Y. K. Chen, "The friction and wear of polymers in non-conformal contacts," *Wear*, vol. 200, no. 1, pp. 83-94, 1996.
- [83] S. N. Kukureka, C. J. Hooke, M. Rao, P. Liao, and Y. K. 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.
- [84] Y. K. Chen, S. N. Kukureka, C. J. 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.
- [85] M. Karimpour, K. D. Dearn, and D. Walton, "A kinematic analysis of meshing polymer gear teeth," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 224, no. 3, pp. 101-115, 2010.
- [86] K. Dearn, T. Hoskins, L. Andrei, and D. Walton, "Lubrication regimes in high-performance polymer spur gears," *Advances in Tribology*, vol. 2013, 2013.
- [87] J. Sukumaran, M. Ando, P. De Baets, V. Rodriguez, L. Szabadi, G. Kalacska, and V. Paepegem, "Modelling gear contact with twin-disc setup," *Tribology International*, vol. 49, pp. 1-7, 2012.
- [88] T. J. Hoskins, K. D. Dearn, S. N. Kukureka, and D. Walton, "Acoustic noise from polymer gears - A tribological investigation," *Materials and Design*, vol. 32, no. 6, pp. 3509-3515, 2011.
- [89] N. A. Wright, and S. N. Kukureka, "Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears," *Wear*, vol. 250-251, no. PART 2, pp. 1567-1578, 2001.
- [90] D. H. Gordon, and S. N. Kukureka, "The wear and friction of polyamide 46 and polyamide 46/aramid-fibre composites in sliding-rolling contact," *Wear*, vol. 267, no. 1, pp. 669-678, 2009.

- [91] M. Rao, C. J. Hooke, S. N. Kukureka, P. Liao, and Y. K. Chen, "The effect of PTFE on the friction and wear behavior of polymers in rolling-sliding contact," *Polymer Engineering & Science*, vol. 38, no. 12, pp. 1946-1958, 1998.
- [92] S. N. Kukureka, Y. K. Chen, C. J. Hooke, and P. Liao, "The wear mechanisms of acetal in unlubricated rolling-sliding contact," *Wear*, vol. 185, no. 1-2, pp. 1-8, 1995.
- [93] D. Walton, A. B. Cropper, D. J. Weale, and P. K. Meuleman, "The efficiency and friction of plastic cylindrical gears. Part 1: Influence of materials," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 216, no. 2, pp. 75-92, 2002.
- [94] A. R. Breeds, S. N. Kukureka, K. Mao, D. Walton, and C. J. Hooke, "Wear behaviour of acetal gear pairs," *Wear*, vol. 166, no. 1, pp. 85-91, 1993.
- [95] A. Crook, "Some studies of wear and lubrication," *Wear*, vol. 2, no. 5, pp. 364-393, 1959.
- [96] H. Krause, and H. Lehna, "Investigation of tribological characteristics of rolling-sliding friction systems by means of systematic wear experiments under well-defined conditions," *Wear*, vol. 119, no. 2, pp. 153-174, 1987.
- [97] I. Hutchings, and P. Shipway, *Tribology: friction and wear of engineering materials*: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [98] P. Clayton, and D. Danks, "Effect of interlamellar spacing on the wear resistance of eutectoid steels under rolling-sliding conditions," *Wear*, vol. 135, no. 2, pp. 369-389, 1990.
- [99] K. Adachi, K. Hokkirigawa, and K. Kato, "The wear mechanism of silicon nitride in rolling-sliding contact," *Wear*, vol. 151, no. 2, pp. 291-300, 1991/12/20/, 1991.
- [100] J. E. Garnham, and J. H. Beynon, "Dry rolling-sliding wear of bainitic and pearlitic steels," *Wear*, vol. 157, no. 1, pp. 81-109, 1992.
- [101] J. Garnham, and J. Beynon, "The early detection of rolling—sliding contact fatigue cracks," *Mechanics and Fatigue in Wheel/Rail Contact*, pp. 103-116: Elsevier, 1991.
- [102] M. Sato, P. M. Anderson, and D. A. Rigney, "Rolling-sliding behavior of rail steels," *Wear*, vol. 162-164, pp. 159-172, 1993.
- [103] J. E. Garnham, and J. H. Beynon, "The early detection of rolling—sliding contact fatigue cracks," *Mechanics and Fatigue in Wheel/Rail Contact*, S. L. Grassie, ed., pp. 103-116, Oxford: Elsevier, 1990.
- [104] M. B. Karamiş, "Tribological behaviour of plasma nitrided 722M24 material under dry sliding conditions," *Wear*, vol. 147, no. 2, pp. 385-399, 1991.
- [105] D. Koffi, A. Koffi, L. Toubal, "Évaluation du comportement et de l'endommagement d'un composite thermoplastique renforcé par des fibres courtes de bois", Association Franco-Maghrébine de Mécanique et des Matériaux, Journées d'Etudes Techniques 10^{ème} édition, Marrakech, Maroc, 2-4 Mai 2018.
- [106] 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.
- [107] I. 2012, "Plain bearings- Testing of the tribological behaviour of bearing materials- Part 2: Testing of polymer-based bearing materials ", pp. 2-10, 01-10-2012, 2012.
- [108] A. Bravo, "Étude de l'endommagement thermomécanique des pièces en bioplastique et composites de fibres naturelles : application aux engrenages," Thèse de doctorat, 2017.
- [109] Y. Yamada, and K. Tanaka, "Effect of the degree of crystallinity on the friction and wear of poly(ethylene terephthalate) under water lubrication," *Wear*, vol. 111, no. 1, pp. 63-72, 1986.

- [110] J. Byett, and C. Allen, "Dry sliding wear behaviour of polyamide 66 and polycarbonate composites," *Tribology international*, vol. 25, no. 4, pp. 237-246, 1992.
- [111] W. H. J. F. Archard, "The wear of metals under unlubricated conditions," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 236, no. 1206, pp. 397, 1956.
- [112] G. L. Wannop, and J. R. Archard, "Elastic Hysteresis and a Catastrophic Wear Mechanism for Polymers," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 187, no. 1, pp. 615-623, 1973.
- [113] D. V. Rosato, and M. G. Rosato, *Injection molding handbook*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [114] N. Chand, and U. K. Dwivedi, "Influence of fiber orientation on high stress wear behavior of sisal fiber-reinforced epoxy composites," *Polymer Composites*, vol. 28, no. 4, pp. 437-441, 2007.

ANNEXES

RÉSULTATS DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Tableau 11 : Résultats des essais effectués sur les disques montrant l'effet de la teneur en fibres sur l'usure à une vitesse de 500 tr/min, une charge de 199 N et un taux de glissement de 22.22%

Teneur en fibres	Test 1				Test 2				Test 3				Usure moyenne (g)	Taux d'usure moyen (kg/s)	Ecart types
	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (kg/s)			
10%	15,59 8	15,5 45	0,0 53	3,79E- 09	16, 64 1	16, 58 9	0,05 2	3,46E- 09	17,16 5	17, 11 1	0,054	3,69E- 09	0,053	3,65E-09	1,39612 E-10
	16,11 4	16,0 67	0,0 47	3,13E- 099	17, 35 4	17, 32 2	0,03 2	3,54E- 09	17,75 7	17, 69 5	0,062	3,12E- 09	0,047	3,26E-09	1,94533 E-10
20%	16,45	16,4 05	0,0 45	2,91E- 09	16, 54 1	16, 51 1	0,03	3,11E- 09	16,21 1	16, 15 1	0,06	3,361E- 09	0,045	3,13E-09	1,85069 E-10
	17,09 8	17,0 55	0,0 43	2,25E- 09	16, 66	16, 62 8	0,03 2	1,97E- 09	16,89 8	16, 87 7	0,021	2,44E- 09	0,032	2,22E-09	1,95348 E-10
30%	16,95 2	16,9 11	0,0 41	2,89E- 09	17, 41 4	17, 37 6	0,03 8	2,62E- 09	17,26 5	17, 23	0,035	2,40E- 09	0,038	2,64E-09	2,0013 E-10
	16,95 7	16,9 32	0,0 25	1,71E- 09	16, 25 4	16, 22 8	0,02 6	1,46E- 09	15,95 2	15, 93 4	0,018	1,6166 E-09	0,023	1,6E-09	1,02575 E-10
40%	16,94 8	16,9 29	0,0 19	1,5152 E-09	17, 35 2	17, 33	0,02 2	1,32900 E-09	17,02 1	16, 99 9	0,022	1,5307 E-09	0,021	1,46E-09	9,16476 E-11
	17,73 9	17,7 2	0,0 19	1,359E- 09	15, 95 4	15, 93 9	0,01 5	1,28720 E-09	17,10 1	17, 07 8	0,023	1,312E- 09	0,019	1,32E-09	2,97756 E-11

Tableau 12 : Résultats des essais effectués sur les disques 40 % en masse de fibres montrant l'effet de la charge appliquée sur l'usure à une vitesse de 500 tr/min et un taux de glissement de 22.22%.

Couple	Test 1				Test 2				Test 3				Usure moyenne (g)	Taux d'usure moyen (kg/s)	Ecart types
	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (kg/s)			
101 N	16,7 21	16, 70 8	0,01 3	8,80E- 10	16,8 85	16,8 74	0,01 1	7,90E- 10	17,1 12	17,10 0	0,012	8,30E- 10	0,012	8,33E-10	3,68E- 11
	18,2 00	18, 19 4	0,00 65	4,55E- 10	17,6 52	17,6 46	0,00 6	3,89E- 10	15,9 54	15,94 8	0,005 8	4,06E- 10	0,006	4,17E-10	2,82E- 11
199 N	17,2 65	17, 24 3	0,02 18	1,515E- 09	15,6 40	15,6 21	0,01 91	1,33E- 09	16,6 40	16,61 8	0,022 0	1,53E- 09	0,021	1,4583E- 09	9,16E- 11
	15,6 54	15, 63 4	0,01 96	1,3590E- 09	15,6 65	15,6 46	0,01 85	1,29E- 09	16,8 10	16,79 1	0,018 9	1,31E- 09	0,019	1,3194E- 09	2,98E- 11
302 N	17,6 50	17, 60 9	0,04 07	2,8250E- 09	17,3 10	17,2 77	0,03 26	2,27E- 09	17,2 19	17,17 8	0,040 7	2,83E- 09	0,038	2,6389E- 09	2,64E- 10
	16,6 59	16, 62 7	0,03 17	2,1984E- 09	16,9 42	16,9 04	0,03 84	2,67E- 09	15,9 81	15,94 3	0,037 9	2,63E- 09	0,036	2,5000E- 09	2,14E- 10

Tableau 13 : Résultats des essais effectués sur les disques 40% en masse de fibres montrant l'effet du taux de glissement sur l'usure à une vitesse de 500 tr/min et une charge de 302 N

Taux de glissement	Test1				Test 2				Test 3				Usure Moyenne (g)	Taux d'usure moyen (Kg/s)	Ecart types
	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Taux d'usure (Kg/s)			
1,79%	17,243	17,2322	0,0108	7,5135E-10	16,548	16,5381	0,0099	6,8632E-10	16,328	16,3271	0,0009	6,4565E-10	0,014393	6,94444E-10	4,35E-11
	15,642	15,6323	0,0097	6,7354E-10	17,644	17,6330	0,0110	7,6153E-10	16,354	16,3531	0,0009	6,4825E-10	0,015107	6,94444E-10	4,86E-11
5,13%	17,659	17,6415	0,0175	1,2122E-09	18,021	18,0025	0,0185	1,2865E-09	17,326	17,3242	0,0018	1,2513E-09	0,026096	1,25E-09	3,03E-11
	16,654	16,6364	0,0176	1,2198E-09	17,115	17,0979	0,0171	1,1846E-09	17,326	17,3244	0,0016	1,1374E-09	0,024506	1,18056E-09	3,38E-11
10,53%	15,329	15,3089	0,0201	1,3956E-09	16,359	16,3388	0,0202	1,4056E-09	16,326	16,3244	0,0016	1,1570E-09	0,028559	1,31944E-09	1,15E-10
	16,94	16,9208	0,0192	1,3359E-09	16,894	16,8756	0,0184	1,2798E-09	16,326	16,3241	0,0019	1,3425E-09	0,026721	1,31944E-09	2,81E-11
18,18%	16,811	16,7771	0,0339	2,3560E-09	15,958	15,9274	0,0306	2,1259E-09	15,339	15,3362	0,0028	1,9765E-09	0,044689	2,15278E-09	1,56E-10
	17,267	17,2340	0,0330	2,2940E-09	15,655	15,6166	0,0384	2,6648E-09	15,865	15,8617	0,0033	2,3330E-09	0,052651	2,43056E-09	1,66E-10
22,22%	15,982	15,9413	0,0407	2,8250E-09	17,654	17,6214	0,0326	2,2650E-09	16,326	16,3220	0,0040	2,8267E-09	0,050133	2,63889E-09	2,64E-10
	16,201	16,1693	0,0317	2,1984E-09	15,695	15,6566	0,0384	2,6685E-09	17,645	17,6413	0,0037	2,6331E-09	0,052665	2,5E-09	2,14E-10

Tableau 14 : Résultats des essais effectués sur les disques 40% en masse de fibres montrant l'effet de la vitesse de rotation sur l'usure à une charge de 302 N et un taux de glissement de 22.22%.

Vitesse de rotation	Test 1				Test 2				Test 3				Usure moyenne (g)	Taux d'usure moyen (Kg/s)	Ecart types
	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	taux d'usure (Kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	taux d'usure (Kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	taux d'usure (Kg/s)			
200 rpm	17,41 1	17,38 94	0,021 6	1,5024E-09	17,39	17,3708	0,0192	1,3325E-09	17,194	17,1918	0,0022	1,5400E-09	0,028556	1,46E-09	9,03E-11
	17,08 4	17,05 52	0,028 8	1,9966E-09	17,059	17,0366	0,0224	1,5561E-09	18,041	18,0387	0,0023	1,6556E-09	0,034309	1,7361E-09	1,89E-10
400 rpm	17,29 3	17,26 66	0,026 4	1,8325E-09	17,265	17,2397	0,0253	1,7560E-09	16,964	16,9609	0,0031	2,2435E-09	0,037223	1,944E-09	2,14E-10
	17,57 2	17,54 70	0,025 0	1,7354E-09	17,545	17,5206	0,0244	1,6965E-09	17,61	17,6069	0,0031	2,1931E-09	0,03583	1,875E-09	2,25E-10
500 rpm	17,04 1	17,00 03	0,040 7	2,8250E-09	17,004	16,9714	0,0326	2,2654E-09	16,948	16,9440	0,0040	2,8266E-09	0,050139	2,639E-09	2,64E-10
	17,66 5	17,63 33	0,031 7	2,1984E-09	17,642	17,6036	0,0384	2,6685E-09	17,739	17,7353	0,0037	2,6331E-09	0,052665	2,5E-09	2,14E-10

Tableau 15 : Résultats des essais effectués sur les engrenages montrant l'effet de teneur en fibres sur l'usure à une vitesse de 500 tr/min et un couple de 4N.m.

Teneur en fibres	Test 1				Test 2				Test 3				Usure moyenne (g)	Taux d'usure moyen (Kg/s)	Ecart types
	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	taux d'usure (Kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	taux d'usure (Kg/s)	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	taux d'usure (Kg/s)			
0%	25,491	25,4750	0,0160	1,11E-06	25,507	25,4923	0,0147	1,02E-06	25,732	25,7306	0,0014	9,9600E-07	0,02141	1,04E-06	4,91E-08
10%	25,555	25,5400	0,0150	1,04E-06	25,571	25,5566	0,0144	9,99E-07	25,562	25,5607	0,0013	9,1900E-07	0,020664	9,86E-07	5,02E-08
20%	25,763	25,7493	0,0137	9,53E-07	25,778	25,7650	0,0130	9,05E-07	25,736	25,7347	0,0013	9,2900E-07	0,018907	9,29E-07	1,96E-08
30%	25,8	25,7942	0,0058	4,03E-07	25,813	25,8063	0,0067	4,62E-07	25,625	25,6245	0,0005	3,8600E-07	0,009128	4,17E-07	3,26E-08
40%	25,316	25,3126	0,0034	2,33E-07	25,335	25,3323	0,0027	1,88E-07	25,735	25,7347	0,0003	2,0300E-07	0,00411	2,08E-07	1,87E-08

Tableau 16 : Résultats des essais effectués sur des engrenages de 40% en masse de fibres montrant l'effet du couple sur l'usure à une vitesse de rotation de 500 tr/min.

Couple	Test 1				Test 2				Test 3				Perte de masse relative moyenne	Ecart types
	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative		
2 N m	25,35 1	25,3492	0,001 8	0,00710 03	25,651	25,6485	0,0025	0,0025	25,7 32	25,730 3	0,00 17	1,7000E- 03	0,0078410	0,000 4
	25,32 5	25,3235	0,001 5	0,00592 30	25,634	25,6335	0,0005	0,0005	25,5 62	25,561 0	0,00 10	1,0000E- 03	0,0039107	0,000 4
4 N m	25,33 2	25,3285	0,003 5	0,01381 65	26,235	26,2305	0,0045	0,0045	25,7 36	25,732 0	0,00 40	4,0000E- 03	0,0155171	0,000 4
	25,00 2	24,9995	0,002 5	0,00999 92	25,325	25,3235	0,0015	0,0015	25,6 25	25,620 0	0,00 50	5,0000E- 03	0,0116221	0,001 5
5 N m	25,95 6	25,9492	0,006 8	0,02619 82	25,442	25,4346	0,0074	0,0074	25,7 35	25,728 2	0,00 68	6,8000E- 03	0,0276298	0,000 3
	25,32 1	25,3133	0,007 7	0,03040 95	25,309	25,3022	0,0068	0,0068	25,3 5	25,343 5	0,00 65	6,5000E- 03	0,0274187	0,000 5
6 N m	25,98 5	25,9755	0,009 5	0,03655 96	25,66	25,6504	0,0096	0,0096	25,7 92	25,781 1	0,01 09	1,0900E- 02	0,0396873	0,000 6
	25,12 3	25,1120	0,011 0	0,04378 46	25,142	25,1320	0,0100	0,0100	25,1 02	25,096 0	0,00 60	6,0000E- 03	0,0358323	0,002 2

Tableau 17 : Résultats des essais effectués sur des engrenages de 40% en masse de fibres montrant l'effet du couple sur l'usure à une vitesse de rotation de 1000 tr/min.

Couple	Test 1				Test 2				Test 3				Perte de masse relative moyenne	Usure Moyenne (g)	Ecart types
	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative			
2 N.m	25,3 31	25,3 240	0,00 70	0,0276 341	25,9 54	25,95 10	0,00 30	0,0116	25,7 32	25,7 270	0,00 50	0,02	0,019416 722	0,005	0,00041
	25,4 31	25,4 190	0,01 20	0,0471 865	25,8 43	25,84 00	0,00 30	0,0116	25,5 62	25,5 560	0,00 60	0,02	0,027183 41	0,007	0,00850
4 N.m	25,7 56	25,7 480	0,00 80	0,0310 607	25,6 44	25,63 40	0,01 00	0,0390	25,7 36	25,7 300	0,00 60	0,02	0,031066 755	0,008	0,00071
	25,7 92	25,7 880	0,00 40	0,0155 087	25,1 02	25,08 90	0,01 30	0,0518	25,5 25	25,5 120	0,01 30	0,05	0,038833 443	0,010	0,01132

Tableau 18 : Résultats des essais effectués sur des engrenages de 40% en masse de fibres montrant l'effet du couple sur l'usures à une vitesse de rotation de 1500 tr/min.

Couple	Test 1				Test 2				Test 3				Perte de masse relative moyenne	Usure moyenne (g)	Ecart types
	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative	m1 (g)	m2 (g)	Δm (g)	Perte de masse relative			
2 N.m	25,3 32	25,32 35	0,00 85	0,0335 544	25,9 96	25,98 85	0,00 75	0,0289	25,3 35	25,3 270	0,00 80	0,03	0,031066755	0,008	0,0004
	25,3 15	25,30 75	0,00 75	0,0296 267	25,3 36	25,33 54	0,00 07	0,0026	25,4 87	25,4 742	0,01 29	0,05	0,02718341	0,007	0,0050
4 N.m	25,6 45	25,63 75	0,00 75	0,0292 455	25,4 85	25,47 65	0,00 85	0,0334	25,3 64	25,3 560	0,00 80	0,04	0,034950099	0,009	0,0004
	25,0 13	25,01 05	0,00 25	0,0099 948	25,8 74	25,87 25	0,00 15	0,0058	25,3 94	25,3 740	0,02 00	0,08	0,031066755	0,008	0,0085