

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**ÉTUDE DE CARACTÉRISATION MÉTROLOGIQUE DE L'USURE DES
ENGRENAGES DES COMPOSITES ET NANOCOMPOSITES DE FIBRES
NATURELLES - THERMOPLASTIQUE/BOULEAU**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE**

**PAR
YOUNESS HERBA**

MARS 2022

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

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE - CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE

(M. SC. A.)

Direction de recherche :

Demagna Koffi, Ing., Ph.D., Professeur, UQTR	Directeur de recherche
--	------------------------

Jury d'évaluation

Demagna Koffi, Ing., Ph.D., Professeur, UQTR	Directeur et évaluateur
--	-------------------------

Lotfi Toubal, Ing, Ph.D., Professeur, UQTR	Président du jury et évaluateur
--	---------------------------------

Fouad Erchiqui, Ph.D., Professeur, UQAT	Évaluateur externe
---	--------------------

DÉDICACES

Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont soutenu durant ces années d'études, à tous ceux qui m'ont supporté et aidé à dépasser les moments difficiles.

À ma chère mère BAHA; tu m'as beaucoup aidé à vivre les difficultés durant ces deux années, tu as été à côté de moi dans mon cœur malgré la distance qui nous sépare. Tu as prié pour moi jour et nuit, ce qui m'a beaucoup aidé durant ces deux années. Une dédicace ne pourra pas exprimer ce que tu as sacrifié pour moi. Je te dédie ce travail de tout mon cœur. Puisse Dieu t'accorder santé, bonheur et longue vie. Je t'aime.

À mon cher père ABDELLAH; je te dédie ce travail du fond de mon cœur, tu as été à mes côtés dans les meilleurs et pires moments de ma vie. Ce travail représente le résultat du sacrifice que tu as fait pour moi, mon éducation et ma personnalité. Que Dieu te garde et t'accorde santé et longue vie. Je t'aime.

À mes chères sœurs, LAMYAE et SALWA, vous m'avez toujours supporté et aimé. Je vous dédie ce travail de mon profond amour. Je vous aime.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout le personnel du Département de génie mécanique, tous les professeurs et tous mes collègues pour leur soutien tout au long de mon parcours à l'UQTR.

Je remercie particulièrement le professeur Demagna KOFFI, du Département de génie mécanique et chercheur à l'Institut des Innovations en éco-matériaux, écoproduits et éco-énergies à base de biomasse de l'UQTR, mon directeur de recherche, pour son soutien et son précieux temps qu'il m'a accordé.

Je remercie les membres de l'université pour leurs aides et facilités durant ces années.

Je remercie également mes amis pour leurs soutiens, Anass, Abdelhadi, Aziz, Kékéli et Agbelenko Koffi, sans oublier Yassine mon colocataire pour ces moments ensemble.

RÉSUMÉ

L'utilisation des matériaux polymères dans les engrenages a connu une grande progression ces dernières années. En effet, ces matériaux offrent une multitude d'avantages par rapport à l'acier comme la légèreté, la résistance à la corrosion, le fonctionnement sans lubrifiant et un faible coût de production. Cependant, les engrenages en matériaux polymères non renforcés sont moins performants que les matériaux renforcés. Ces renforts peuvent être synthétiques ou naturels et donnent de meilleures propriétés mécaniques à ces matériaux dans des applications à faible charge et température. L'ajout de fibres naturelles permet d'obtenir un matériau composite non seulement avec une meilleure tenue mécanique, mais aussi une recyclabilité avec une consommation réduite des matériaux synthétiques.

Les chercheurs sont de plus en plus intéressés par les fibres naturelles pour des raisons économiques et écologiques. D'ailleurs, les travaux effectués portent sur l'étude du comportement tribologique des engrenages en polyéthylène à haute densité renforcé par des fibres de bouleau. Dans cette étude, une caractérisation métrologique de l'usure sur les engrenages a été élaborée. En effet, elle évalue l'usure en termes de réduction de l'épaisseur de la dent ainsi que sa forme après essai tout en montrant l'effet des paramètres de fonctionnement sur ce mode de défaillance.

Sur un banc d'essai, qui simule le fonctionnement réel des engrenages en composite à fibres naturelles, des tests ont été effectués avec plusieurs paramètres tels que la vitesse de rotation, la charge et le pourcentage de fibres dans les composites.

Les résultats obtenus ont permis d'observer le comportement tribologique des engrenages et plus précisément l'usure des dents. En effet, l'usure diminue en augmentant le pourcentage de fibres. Les échantillons avec un pourcentage de 30 % et 40 % ont montré une bonne résistance à l'usure par rapport aux autres échantillons. En addition, l'usure augmente au fur et à mesure que le couple et la vitesse de rotation augmentent.

L'usure de la dent d'engrenage, en composite de polymère renforcé de fibres naturelles, est quasi-constante tout au long du flanc contrairement aux métaux où l'usure est nulle au niveau du point primitif.

ABSTRACT

The use of polymeric materials in gears has increased significantly in recent years, in fact, these materials offer multiple advantages compared to steel such as lightweight, corrosion resistance, lubricant-free functioning and low production costs. However, gears made of unreinforced polymeric materials are less efficient than reinforced materials. These reinforcements can be synthetic or natural and give these materials better mechanical properties in low load and temperature applications. The addition of natural fibers allows to have a composite material not only with a better mechanical resistance, but also the recyclability with reduced consumption of synthetic materials.

Researchers are increasingly interested in natural fibers for economic and ecological reasons. Moreover, the work carried out concerns the study of the tribological behavior of high-density polyethylene gears reinforced with birch fibers. In this study, a metrological characterization of wear on gears was developed. In fact, it evaluates the wear in terms of tooth thickness reduction as well as its shape after test while showing the effect of the operating parameters on this failure mode.

On a test bench that simulates the real functioning of natural fiber composite gears, tests were performed with several parameters such as rotational speed, load and percentage of fiber in the composites.

The results obtained allowed to observe the tribological behavior of the gears and more precisely the wear of the teeth. In fact, the wear decreases by increasing the percentage of fibers. The samples with a percentage of 30 % and 40 % showed a good resistance to wear compared to the other samples. In addition, the wear increases as the torque and speed of rotation increases. The wear of the gear tooth, made of natural fiber reinforced polymer composite, is all along the flank unlike the metals where the wear is zero at the primitive point.

Table des matières

Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xii
Liste des abréviations.....	xiii
CHAPITRE I – INTRODUCTION.....	1
I.1 Mise en contexte	1
I.1.1 Les engrenages en plastique et composite.....	1
I.1.2 Matériaux composites.....	5
I. 2 Problématique.....	18
I.3 Questions de la recherche.....	18
I.4 Objectif de la recherche	19
I.5 Contenu du mémoire.....	19
CHAPITRE II –CADRE THÉORIQUE ET RECENSION DES ÉCRITS	20
II.1 Cadre théorique	20
II.1.1 Tribologie des matériaux pour les engrenages	20
II.1.2 Mode d'endommagement des engrenages en plastique	21
II.1.3 Equations de l'usure	25
II.1.4 Usure des dents sur des engrenages droits	26
II.1.5 Méthode de mesure de l'usure	27
II.2 Recension des écrits.....	28
II.2.1 Le comportement de tribologie des polymères	28
II.2.2 Le comportement de tribologie des composite à fibres naturelles	37
CHAPITRE III –MÉTHODOLOGIE	52

III.1 Matériaux	52
III.1.1 La matrice	52
III.1.2 Le renfort	52
III.1.3 L'agent de couplage	52
III.2 Préparation des échantillons	52
III.3 Etude expérimentale	55
III.3.1 Dispositifs et principe de fonctionnement	55
III.3.2 Plan d'expérience	57
CHAPITRE IV –ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	59
IV.1 Mesure de l'usure	59
IV.1.1 Métrologie.....	59
IV.1.2 Machine à mesure.....	59
IV.1.3 Principe de mesure	60
IV.2 Évaluation de l'usure en tout point du profil actif.....	67
IV.2.1 Interprétation des résultats	67
IV.2.2 Effet de la teneur en fibre naturelle	74
IV.2.3 Influence des paramètres de fonctionnement sur l'usure	79
CHAPITRE V –CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	88
V.1 Récapitulation	88
V.2 Discussions et conclusions.....	89
V.3 Recommandations et perspectives	90
BIBLIOGRAPHIE.....	91

Liste des figures

Figure I-1 : Les engrenages	1
Figure I-2: Les engrenages à la fin du Moyen âge	2
Figure I-3: Engrenages en bois plus complexe.....	3
Figure I-4: Types d'engrenages.....	4
Figure I-5: État des thermoplastiques	6
Figure I-6 : Courbe des modules en fonction de la température d'un polymère linéaire thermoplastique	7
Figure I-7: Comparaison des propriétés de traction spécifique de quelques fibres naturelles et synthétiques	12
Figure I-8: Nombre d'articles sur les composites polymères renforcés de fibres synthétiques et naturelles	14
Figure I-9: Propriétés chimiques des fibres naturelles.....	15
Figure I-10: Le bouleau jaune	17
Figure II-1: Modes d'endommagements des engrenages	22
Figure II-2: Classement des processus d'usure en fonction du mouvement du corps	24
Figure II-3: Évolution de l'usure en fonction du temps.....	25
Figure II-4: Banc d'essai des engrenages.....	29
Figure II-5: L'usure du Nylon contre Acétal en comparaison avec N/N et A/A (cycles× 106)	30
Figure II-6: les échantillons d'engrenages en plastique.....	31
Figure II-7: Photos des engrenages par la caméra digitale	31
Figure II-8: Résultats d'usure pour les différents échantillons	32
Figure II-9: Résultats du taux d'usure de chaque matériau en fonction du couple (à 600 tr/min et 1200 tr/min)	34
Figure II-10: Variation de l'épaisseur des dents en fonction de nombre de cycles....	35
Figure II-11: Les échantillons de POM et GFR POM	35
Figure II-12: Banc d'essai pour les engrenages	36
Figure II-13: Le taux d'usure pour POM GFR en fonction de la charge.....	36

Figure II-14: Résultats de l'usure en fonction de distance de glissement pour le PRPH.....	38
Figure II-15: Résultats de l'usure en fonction de distance de glissement pour le polyester pur	39
Figure II-16: Résultats de l'usure en fonction de la vitesse de glissement	40
Figure II-17: Schéma du banc d'essai.....	42
Figure II-18: Résultats du coefficient du frottement et de l'usure pour le PRG en fonction de la charge	43
Figure II-19: Résultats du coefficient du frottement et de l'usure pour le PRCS en fonction de la charge.....	44
Figure II-20: Résultats de l'usure en fonction de la longueur de fibre	45
Figure II-21: Comparaison de l'usure du PRCS et PRG en fonction de la longueur de fibre.....	45
Figure II-22: Comparaison de l'usure et du coefficient de frottement du PRCS et PRG en fonction de la longueur de fibre.....	46
Figure II-23: Le taux d'usure en fonction du temps tel que A2 : composite sans fibre ; A4 : composite avec 10 % de sisal ; A6 avec 20 % ; A8 avec 40 % ; A avec 60 % et C avec 80%	47
Figure II-24: Relation entre le taux des fibres et la perte de masse.....	48
Figure II-25: Relation entre la charge et la perte de masse.....	49
Figure II-26: Le coefficient de frottement en fonction du taux volumique de fibres .	50
Figure II-27: Le taux d'usure en fonction du taux volumique de fibres	51
Figure III-1: Mélangeur à rouleau	53
Figure III-2: Moule pour fabrication des engrenages	53
Figure III-3: Les étapes de présurassions.....	54
Figure III-4: Banc d'essai à engrenage	56
Figure III-5: Banc d'essai sur engrenages.....	57
Figure IV-1: Machine à mesurer tridimensionnelle.....	60
Figure IV-2: Repère de travail.....	61
Figure IV-3: Dents à mesurer	61
Figure IV-4: Profil de la dent	62
Figure IV-5: Distribution des points à mesurer	63

Figure IV-6: Les points à mesurer	64
Figure IV-7: Le déplacement à mesurer	66
Figure IV-8: Usure (μm) en fonction du pourcentage de fibre pour la roue menée à 1000 tr/min	75
Figure IV-9: Usure (μm) en fonction du pourcentage de fibre pour la roue menante à 1000 tr/min	75
Figure IV-10: Usure (μm) en fonction du pourcentage de fibre pour la roue menée à 500 tr/min	76
Figure IV-11: Usure (μm) en fonction du pourcentage de fibre pour la roue menante à 500 tr/min	77
Figure IV-12: Usure (μm) en fonction des pourcentages de fibres et les couples pour la roue menée à 1000 tr/min	78
Figure IV-13: Usure (μm) en fonction du couple appliqué pour la roue menée à 1000 tr/min.....	79
Figure IV-14: Usure (μm) en fonction du couple appliqué pour la roue menante à 1000 tr/min	80
Figure IV-15: L'usure (μm) en fonction du couple et vitesse pour un pourcentage de 30% et 20% de fibres	81
Figure IV-16: L'usure (μm) en fonction de la vitesse de rotation pour la roue menée de 30% de fibres	82
Figure IV-17: L'usure (μm) en fonction de la vitesse de rotation pour la roue menée de 0% de fibres	83
Figure IV-18: L'usure (μm) en fonction de la vitesse et couple pour la roue menée en 30% de fibres.....	83
Figure IV-19: L'usure (μm) en fonction des positions pour une vitesse de 500 tr/min et un pourcentage de 30 % de fibres.....	84
Figure IV-20: L'usure (μm) en fonction des positions pour une vitesse de 1000 tr/min et un pourcentage de 30 % de fibres.....	85
Figure IV-21: L'usure (μm) en fonction des positions pour une vitesse de 1500 tr/min et un pourcentage de 30 % de fibres.....	86
Figure IV-22: Schématisation du changement du profil de la dent pour chaque couple à 30% de fibres	86

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Propriétés thermiques et physiques de certains thermoplastiques	8
Tableau I-2 : Propriétés mécaniques de certains thermoplastiques	9
Tableau I-3 : Composition de quelques fibres naturelles.....	11
Tableau I-4 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles	13
Tableau I-5 : Différents types de composites avec leurs constituants	14
Tableau I-6: Propriétés des fibres de bouleau	17
Tableau II-1: Spécification des engrenages utilisés.....	28
Tableau II-2: Propriétés mécaniques de chaque matériau.....	28
Tableau II-3 : Propriétés de la fibre de palmier à huile	37
Tableau II-4 : Propriétés des fibres de canne à sucre et des fibres de verre	41
Tableau III-1 : Paramètres des engrenages préparés	55
Tableau III-2: Facteur de contrôle et niveau	58
Tableau IV-1: Position des points sur le flanc de la dent.....	65
Tableau IV-2: Coordonnées du point 1 pour les 3 dents.....	68
Tableau IV-3: Coordonnées du point 1 après essai	68
Tableau IV-4: Différence de coordonnées du point 1.....	68
Tableau IV-5: Déplacement des points (en mm) pour les 3 dents.....	69
Tableau IV-6: Déplacement moyen (en mm) des 3 dents.....	69
Tableau IV-7: Résultats d'usure pour un couple de 2 N.m.....	70
Tableau IV-8: Résultats d'usure pour un couple de 4 N.m.....	71
Tableau IV-9: Résultats d'usure pour un couple de 5 N.m.....	71
Tableau IV-10: Résultats d'usure pour un couple de 6 N.m.....	72
Tableau IV-11: Résultats d'usure pour différents couples en fonction du taux de fibres	73

Liste des abréviations

Acronyme	Désignation
HDPE	Polyéthylène à haute densité
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
PP	Polypropylène
PA	Le polyamide
PVC	Polychlorure de vinyle
PBT	Poly butylène téréphtalate
MMT	Montmorillonite
NPCC	Nanoprécipité de carbonate de calcium
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
POM	Polyoxyméthylène
MAPE	Polyéthylène maléate
MMT	Machine à mesurer tridimensionnelle
PA66	Polyamide 66
C-PRSC	Polyester renforcé de fibres courtes de canne à sucre
C-PRG	Polyester renforcé de fibres courtes de verre

CHAPITRE I – INTRODUCTION

I.1 Mise en contexte

I.1.1 Les engrenages en plastique et composite

I.1.1.1 Définition et histoire

Les engrenages sont des éléments de machines utilisés dans la construction mécanique. Ils sont constitués de deux roues dentées. Ces dernières tournent autour de deux axes fixes, les unes par rapport aux autres, de sorte qu'une des roues entraîne l'autre par contact des dents. La plus petite des roues est nommée pignon.

Les engrenages ont un rôle principal soit de transmettre une puissance ou un mouvement entre deux éléments avec un rapport de vitesse constant. En effet, ils sont utilisés pour avoir une modification de la fréquence de rotation entre les deux arbres, d'où leur classification dans la catégorie des éléments de transmission indirecte.

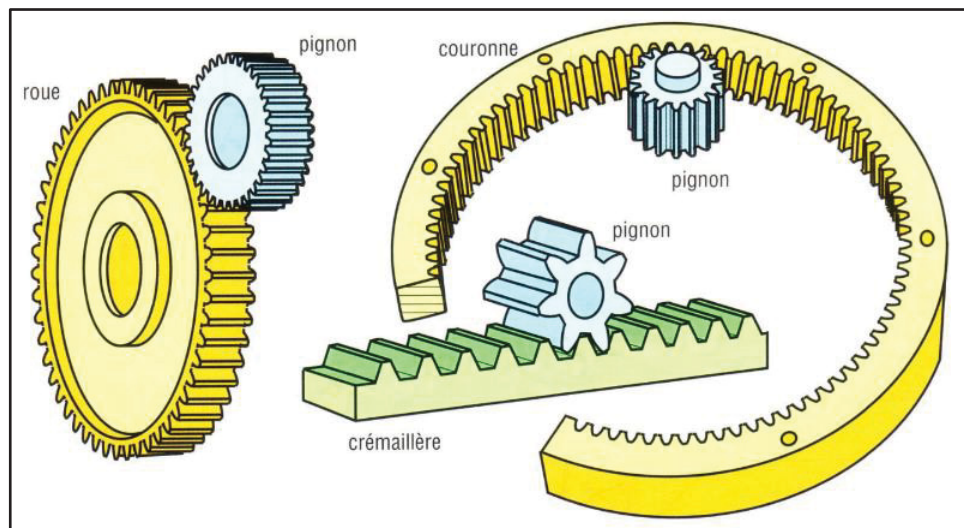


Figure I-1 : Les engrenages [1]

Les engrenages ont plusieurs fonctions : ils peuvent être utilisés pour améliorer le couple moteur, varier la fréquence de rotation des axes et transmettre un mouvement rotatif.

Les engrenages étaient peu utilisés aux 5^e et 4^e siècles avant J.-C. : les mécaniciens grecs privilégiaient les cordes et les poulies pour soulever les charges ou les vis pour les grandes poussées. Leur usage devient courant au Moyen Âge, à partir du 10^e siècle, dans les moulins à eau ou à vent, pour changer le sens et réduire le mouvement de la roue ou les ailes des moulins. Ces premiers engrenages réellement exploitables étaient en bois, à axes parallèles et à denture extérieure droite. Leurs dents sont formées de barres de bois qui sont insérées dans des alésages réalisés sur le périmètre de grands tambours en bois. Cette disposition primaire permet l'engrènement de deux roues dont les axes sont dans le même plan.

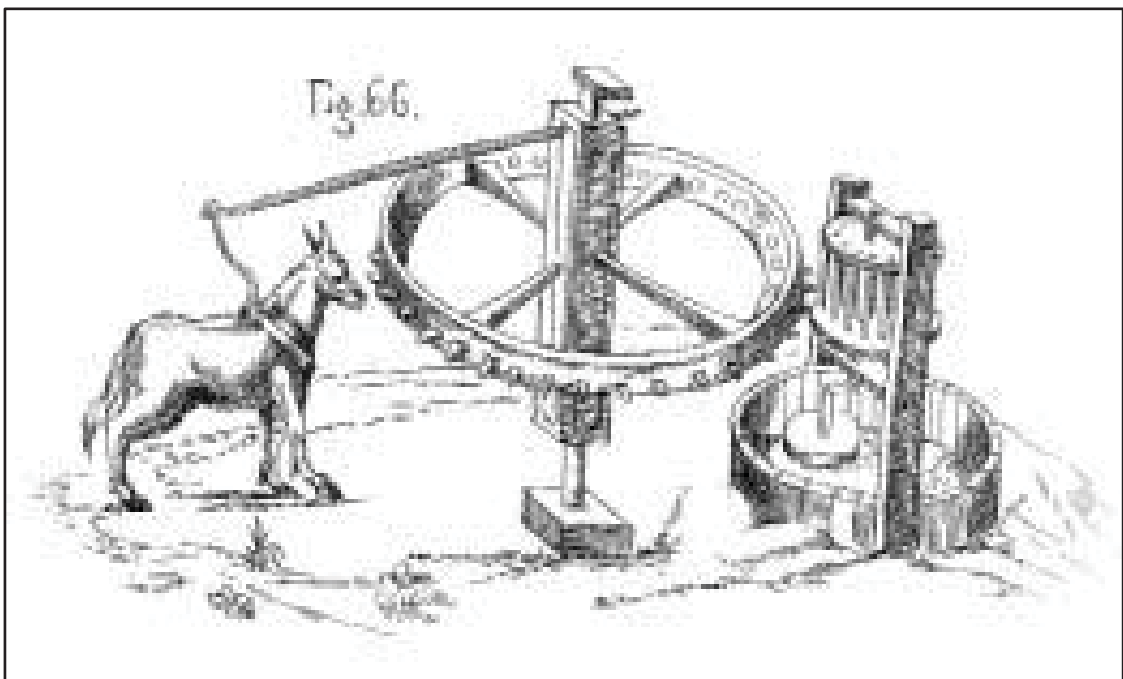


Figure I-2: Les engrenages à la fin du Moyen âge [2]

À la fin du Moyen âge, les engrenages ont pris une nouvelle figure appelée "Lanterne" qui est composée d'une roue dentée engrenant dans un tambour formé par deux blocs de bois reliés par des barres capables de fournir des efforts plus importants. [2]

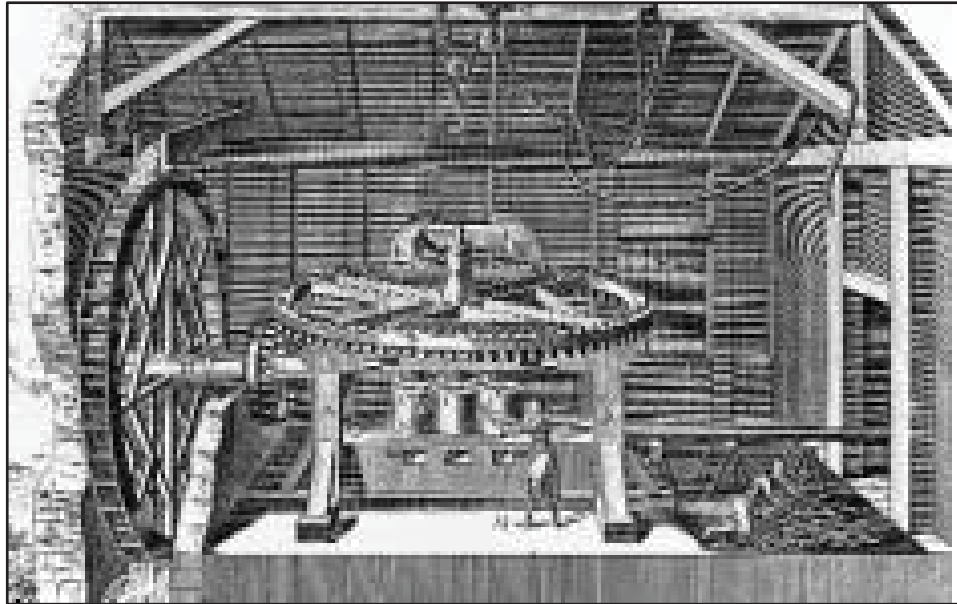


Figure I-3: Engrenages en bois plus complexe [2]

Au 15^e siècle, des mécaniciens italiens, comme Francesco di Giorgio ou Léonard de Vinci, ont fait évoluer ces engrenages en bois en les rendant plus sophistiqués. Au 17^e siècle, l'engrenage métallique, plus précis et plus pratique, se popularise dans la fabrication mécanique et de l'horlogerie, suite aux travaux de La Hire ou d'Euler au siècle suivant, avant de connaître son véritable développement avec la création de machines performantes et puissantes au 19^e siècle à l'aide des recherches de Poncelet ou de Willis.[2]

I.1.1.2 Classification des engrenages

Il existe plusieurs types d'engrenages. Cette variété permet de proposer différents assemblages et applications. La Figure I-4 présente les types d'engrenages.

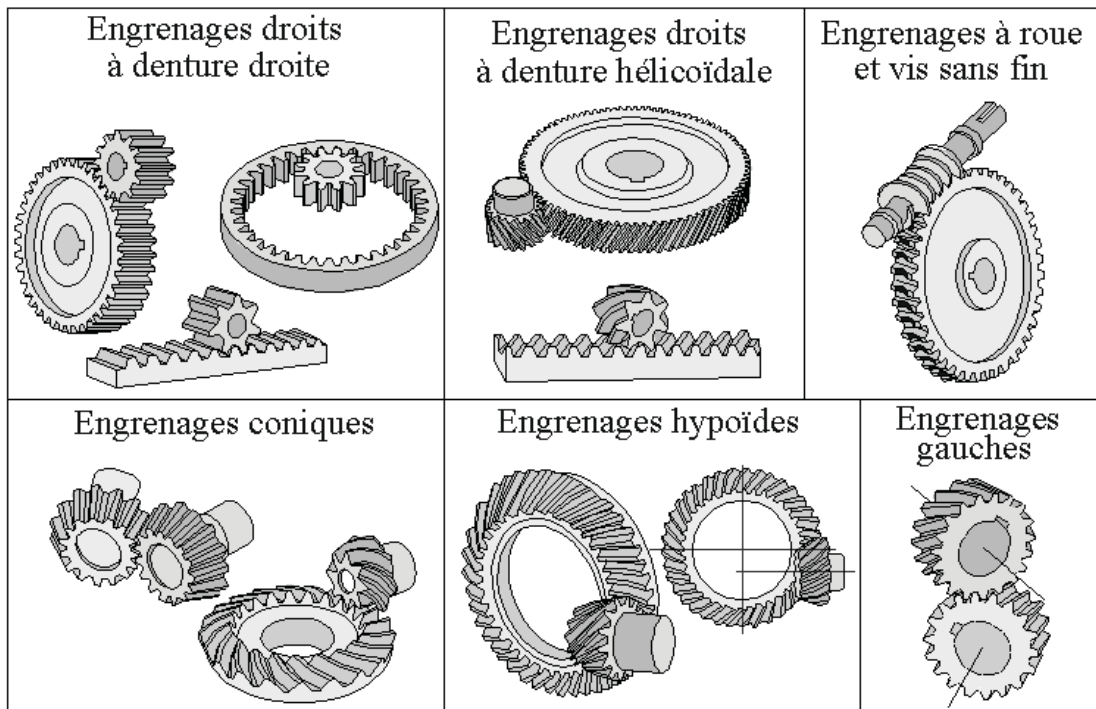


Figure I-4: Types d'engrenages [3]

Engrenages droits à denture droite sont généralement conçus pour assurer la transmission de puissance ainsi que le mouvement entre deux arbres parallèles. Les dents des roues sont parallèles à l'axe de rotation des arbres.

Engrenages droits à denture hélicoïdale dont les dents des deux engrenages sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des arbres, mais dans le sens contraire.

Engrenages coniques dont les axes ne sont pas parallèles et les surfaces primitives sont des cônes et non pas des cylindres.[1]

La section précédente a présenté des généralités sur les engrenages et leur importance dans l'industrie mondiale. Cependant, ils peuvent être une cause de défaillance des équipements mécaniques. En effet, l'usure des surfaces d'engrenages est un phénomène qui s'accompagne d'une transformation chimique et physique des dents d'engrenages, d'où la nécessité de comprendre le fonctionnement de ces éléments afin d'éviter ce mode de défaillance. Dans notre étude, il est question d'engrenage cylindrique à denture droite.

Après avoir défini les engrenages, le chapitre suivant discutera des matériaux polymères et composites et leur utilisation dans les engrenages ainsi que les fibres naturelles et leurs caractéristiques.

I.1.2 Matériaux composites

I.1.2.1 Histoire des composites

Les matériaux composites ont occupé une place essentielle dans la construction tout au long de l'histoire. Ils sont généralement composés de deux ou plusieurs matériaux : les renforts et la matrice. Ce mariage de matériaux offre la possibilité de bénéficier de très bonnes propriétés mécaniques, mais aussi de nombreux atouts, vis-à-vis d'autres matériaux, tels que la légèreté, la résistance chimique et la réalisation de formes complexes. Ces matériaux sont présents dans différents secteurs : automobile, aérien, naval, etc.

Les matériaux composites d'origine naturelle ont été élaborés en raison de la croissance de la population mondiale pour satisfaire les besoins socio-économiques. Le recours à ces matériaux permet de remplacer les métaux classiques qui sont très chers, d'éviter l'utilisation de dérivés du pétrole et de diminuer leur influence sur le climat. [4]

I.1.2.2 Polymères dans le domaine des engrenages

Les grandes liaisons moléculaires non réticulées donnent forme aux thermoplastiques qui sont classés dans une large gamme de polymères et leurs performances mécaniques sont généralement affectées par la température. Il existe deux états possibles pour les thermoplastiques : ils peuvent se trouver à l'état amorphe ou semi-cristallin. À l'état amorphe, les chaînes sont aléatoirement orientées, alors qu'à l'état cristallin, les chaînes sont très structurées. Les polymères ne se présentent que très rarement sous une forme entièrement cristalline et les deux phases se combinent pour constituer un polymère semi-cristallin. [5]

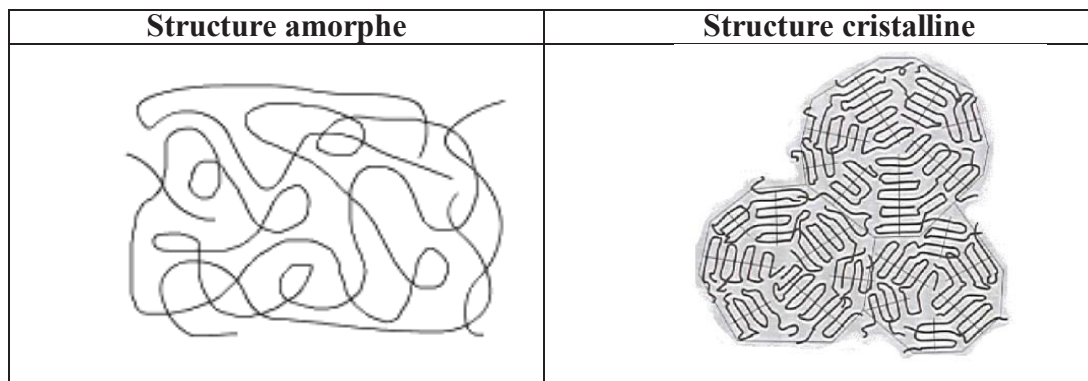


Figure I-5: État des thermoplastiques [5]

I.1.1.3 Thermoplastiques (TP) ou thermodurcissables (TD)

Il existe plusieurs catégories de plastiques : les thermodurcissables, les élastomères, les mousses structurelles et les composites. En raison de leurs divers atouts, tels que la légèreté et le faible coût, ils sont présents dans la majorité des secteurs.

I.1.1.3.1 Thermoplastique TP

Les thermoplastiques sont la classe la plus fabriquée au niveau mondial et ils sont obtenus à partir d'un enchevêtrement de chaînes de monomères qui à leur tour peuvent être linéaires ou ramifiées. Cela a un impact sur la température de fusion, à laquelle on peut distinguer la température de fusion des liaisons faibles de Van Der Waals et la température de fusion des cristaux (Figure I-6). Ils ont des performances mécaniques très importantes et sont des remplaçants efficaces des métaux.

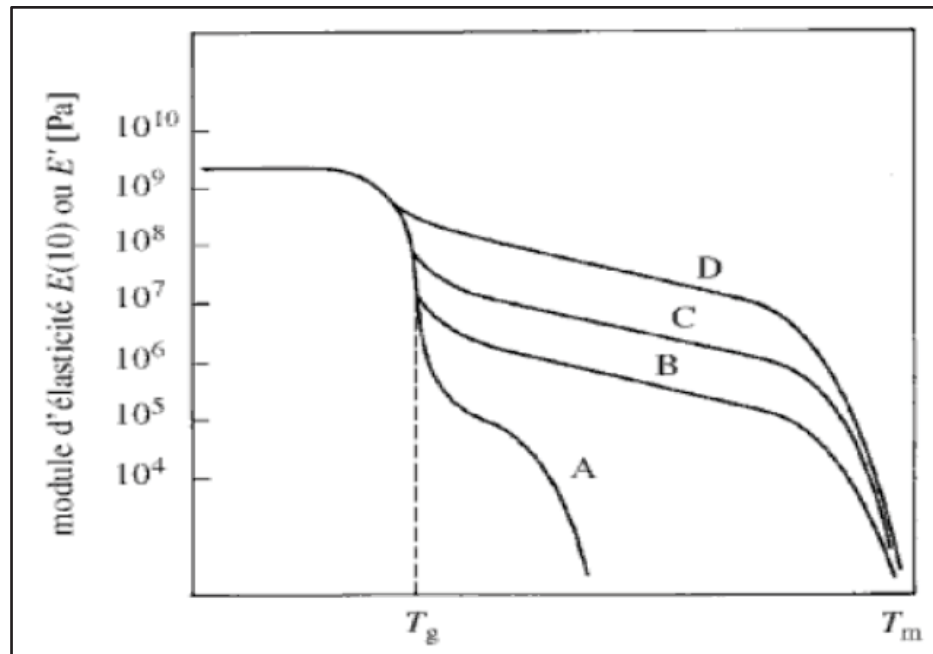


Figure I-6 : Courbe des modules en fonction de la température d'un polymère linéaire thermoplastique [6]

Tableau I-1 montre les différentes propriétés thermiques de quelques thermoplastiques et leurs densités.

Tableau I-1 : Propriétés thermiques et physiques de certains thermoplastiques [6]

Polymère	T_g (°C)	T_m (°C)	T_p (°C)	ρ (g/cm ³)	W_{24h} (%)
PP	(-23) - (-10)	160 - 176	200 - 290	0.899 - 0.92	0.01 - 0.02
PEHD	(-133) - (-100)	120 - 140	150 - 290	0.94 - 1.00	<0.01 - 0.2
PELD	-125	105 - 116	150 - 230	0.91 - 0.925	<0.01
PA-6	40-48	215 - 216	215 - 270	1.09 - 1.14	1.3 - 1.8
PVC	75-105	160 - 220	-	1.39	-

Avec : T_g : Température de transition vitreuse ; T_m : Température de fusion ; T_p : température de moulage[7].

Avant toute utilisation de thermoplastiques, il est nécessaire de veiller à ce que les fibres naturelles et la matrice soient bien compatibles en ce qui concerne les propriétés hygrothermiques puisque les fibres naturelles possèdent une très faible résistance thermique.

On distingue quelques types de polymères qui sont beaucoup utilisés comme les polyéthylènes hauts et basses densités (PEHD et PELD), le polypropylène (PP), le polyamide (PA) et le polychlorure de vinyle (PVC). (Tableau I-2)

Tableau I-2 : Propriétés mécaniques de certains thermoplastiques [6]

Polymère	σ_{max} (MPa)	E (GPa)	σ_f (MPa)	E_f (GPa)	ε (%)
PP	26 - 41.4	0.995 - 1.776	55.2	0.83 - 1.73	15 - 700
PEHD	14.5 - 38	0.413 - 1.49	-	0.41 - 1.07	12 - 1000
PEBD	4 - 18.6	0.055 - 0.38	-	-	90 - 800
PA-6	43 - 79	2.9	69 - 117.3	1.9 - 2.8	20 - 150
PVC	31 - 60	3.78	72.4	-	-

Le polyéthylène (PE)

Le polyéthylène (PE) est le plastique le plus exploité dans le monde avec cent millions de tonnes. Il se caractérise par une basse température de transition vitreuse aux alentours de -10°C et par un point de fusion qui peut aller jusqu'à 140°C .

Le polyéthylène est transparent et chimiquement neutre. Il regroupe trois principales catégories : PEHD (PE haute densité), PEBD (PE basse densité) et PEBDL (PE basse densité linéaire).

Le polychlorure de vinyle (PVC)

Le polychlorure PVC est un produit organique. Il est réalisé à base de sel marin (NaCl) et d'huile. Il a été préparé avec un rajout d'additifs qui apporte au matériau une bonne flexibilité et une certaine facilité de production.

Il existe essentiellement quatre variétés de polychlorure de vinyle : Le PVC rigide servant aux conduites d'égouts, le PVC souple qui possède un effet brillant, les films de PVC plastifiés destinés à la publicité et le PVC expansé.

Le polypropylène (PP)

Le polypropylène est issu du monomère de propylène. Il s'agit d'une résine hydrocarbonée linéaire. Sa structure chimique est le (C₃ H₆). Il est transparent à opaque, dur et très résistant à l'abrasion.

Le polypropylène possède plusieurs avantages : inodore et non toxique, bonne résistance mécanique et très bonne isolation électrique.[7]

I.1.1.3.2 Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des plastiques qui ne fondent pas de façon répétitive. En effet, ils adoptent une forme permanente par le biais de la chaleur. [8]

Les thermodurcissables sont des plastiques réticulés, autrement dit, ils sont composés de chaînes courtes qui retiennent entre elles de longues chaînes linéaires. Ce qui leur assure une grande rigidité tout en les rendant non recyclables. Ils sont majoritairement utilisés dans la matrice des composites parce qu'ils sont très fragiles sans renforts.

Contrairement aux thermoplastiques, les thermodurcissables offrent une bonne résistance à la chaleur et une stabilité dimensionnelle. Cependant, les thermoplastiques offrent une facilité de mise en œuvre et une bonne résistance à l'impact d'où l'utilisation d'un thermoplastique pour la conception des engrenages dans notre étude.

I.1.1.4 La fibre naturelle

I.1.1.4.1 Définition et histoire

Les fibres synthétiques ont été produites à partir de polymères issus de produits pétrochimiques contrairement aux fibres naturelles qui sont obtenues ou produites à partir de plantes et de poils d'animaux.

Les composites en fibres naturelles ont été conçus dans le but de remplacer les composites, renforcés de verre, dans divers secteurs. Les scientifiques commencent à

être intéressés par les composites à base de fibres naturelles pour de multiples raisons, comme leur potentialité à remplacer les plastiques à base de fibres synthétiques à un coût moins élevé et avec une plus grande durabilité. [9]

Les fibres naturelles sont parmi les diverses variétés de fibres qui ont atteint une certaine importance en raison de leur aspect biodégradable, de leur faible densité, de leur faible coût, de leurs propriétés spécifiques élevées et de leurs propriétés thermiques raisonnables. [10]

Les propriétés des composants contribuent de manière significative à améliorer les propriétés des matériaux composites. [11]

En réalité, pour des considérations économiques et écologiques, le recours aux fibres naturelles, en tant que renfort dans les matériaux composites, est très demandé dans le monde entier.[7]

Tableau I-3 : Composition de quelques fibres naturelles [12]

Fibre type	Cellulose (%)	Lignin (%)	Pentosan (%)	Ash (%)	Silica (%)
Rice	28–48	12–16	23–28	15–20	9–14
Wheat	29–51	16–21	26–32	4.5–9	3–7
Oat	31–48	16–19	27–30	2–5	0.5–4
Bagasse	32–48	19–24	27–23	1.5–5	0.7–3.5
Bamboo	26–43	21–31	15–26	1.7–5	0.7
Seed flax	43–47	21–23	24–26	5	—
Kenaf	44–57	15–19	22–23	2–5	—
Jute	45–63	21–26	18–21	0.5–2	—
Hemp	57–77	9–13	14–17	0.8	—
Ramie	87–91	—	5–8	—	—
Kenaf	37–49	15–21	18–24	2–4	—
Jute	41–48	21–24	18–22	0.8	—
Abaca	56–63	7–9	15–17	1–3	—
Sisal	43–62	7–9	21–24	0.6–1	—
Cotton	85–96	0.7–1.6	1–3	0.8–2	—
Coniferous	40–45	26–34	7–14	<1	—
Deciduous	38–49	23–30	19–26	<1	—

Les fibres naturelles, qui sont utilisées en tant que renfort dans les composites, ne posent pas de risques vis-à-vis de l'environnement. Elles sont classifiées en trois types : les fibres végétales, animales et minérales.

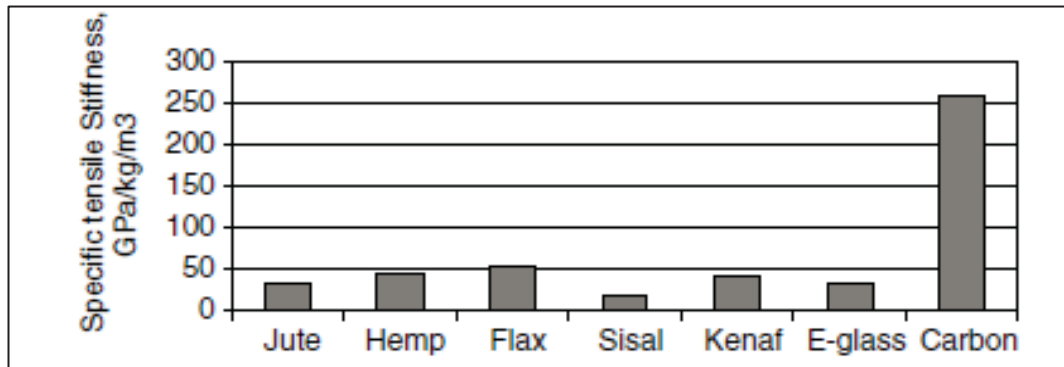


Figure I-7: Comparaison des propriétés de traction spécifique de quelques fibres naturelles et synthétiques [12]

Les fibres végétales sont principalement composées de cellulose, comme le coton, le lin, la jute, le sisal et le chanvre. Alors que les fibres animales sont majoritairement composées de protéines, les poils des animaux étant d'ailleurs considérés comme des fibres animales. Les fibres minérales sont les plus courantes et les plus délicates à obtenir à partir de minéraux (Tableau I-3) .[9]

Tableau I-4 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles [6]

Fibre	Densité (g/cm ³)	Contrainte maximum en traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Déformation maximum en traction (%)
Fibres végétales				
Chanvre	1,45 – 1,55	300 – 900	25 – 60	2 - 5
Bois	0,3 – 1.1	80 – 200	8 – 15	-
Lin	1,54	600 – 2000	12 – 85	1 – 4
Sisal	1,45	350 – 700	9 – 21	3 – 7
Coton	1,5 – 1,6	287 – 597	5,5 – 12,6	7 – 8
Jute	1,44	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8
Fibres synthétiques				
Verre	2,54	2000 – 2400	72 – 73	3
Carbone	1,7 – 1,9	3500	230	1,5

Ces dernières années, les composites à base de fibres naturelles, qui proviennent de ressources naturelles telles que les plantes, les animaux ou les minéraux, sont considérés comme importants sur le plan économique et écologique, mais avec des propriétés mécaniques inférieures par rapport aux fibres synthétiques (Figure I-7). La sensibilisation à la protection de la nature dans le monde entier a augmenté et a entraîné un intérêt pour la recherche et le développement de matériaux biodégradables à haute performance.[13]

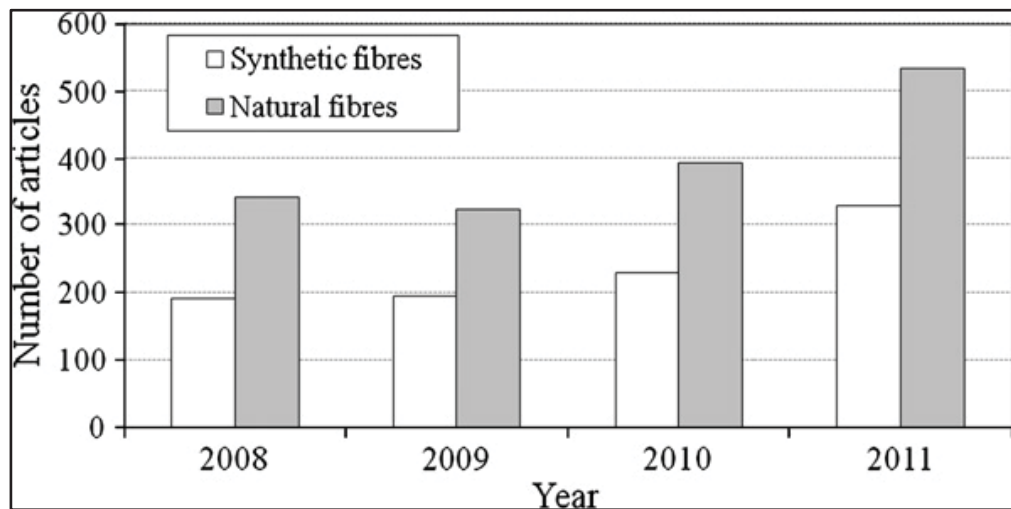


Figure I-8 : Nombre d'articles sur les composites polymères renforcés de fibres synthétiques et naturelles [13]

Les fibres synthétiques améliorent les propriétés des composites telles que la résistance et la rigidité tout en réduisant le poids. Cependant, elles présentent des inconvénients tels qu'une densité élevée, un coût élevé, un recyclage et des propriétés de biodégradation médiocre (

Tableau I-4). [9].

Tableau I-5 : Différents types de composites avec leurs constituants [14]

Type de composite	Constituant
1. Composites à matrice organique	Résine/charges/fibres cellulosiques
Papier, carton	Résine/copeaux de bois
Panneaux de particules	Résine/fibres de bois
Panneaux de fibres	Résines souples/tissus
Toiles enduites	Élastomères/bitume/textile
Matériaux d'étanchéité	Caoutchouc/toile/acier
pneumatiques	Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc.
Stratifiés	Résines/microsphères
Plastiques renforcés	

2. Composites à matrice minérale Béton Composite carbone-carbone Composite céramique	Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres céramiques
3. Composites à matrice métallique	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone
4. Composites à structure sandwich Peaux Âmes	Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeille, balsa, plastiques renforcés, etc.

Durant ces dernières années, les chercheurs ont commencé à s'intéresser de plus en plus aux fibres naturelles (Figure I-8). Ces dernières sont capables d'améliorer les propriétés mécaniques des polymères en prenant en considération certaines particularités et en perfectionnant les aspects de surface de ces fibres. Il existe de nombreux facteurs associés aux fibres naturelles qui ont une influence sur les performances des composites, notamment l'adhérence interrassiale, l'orientation, la résistance, les propriétés physiques, etc. [13]

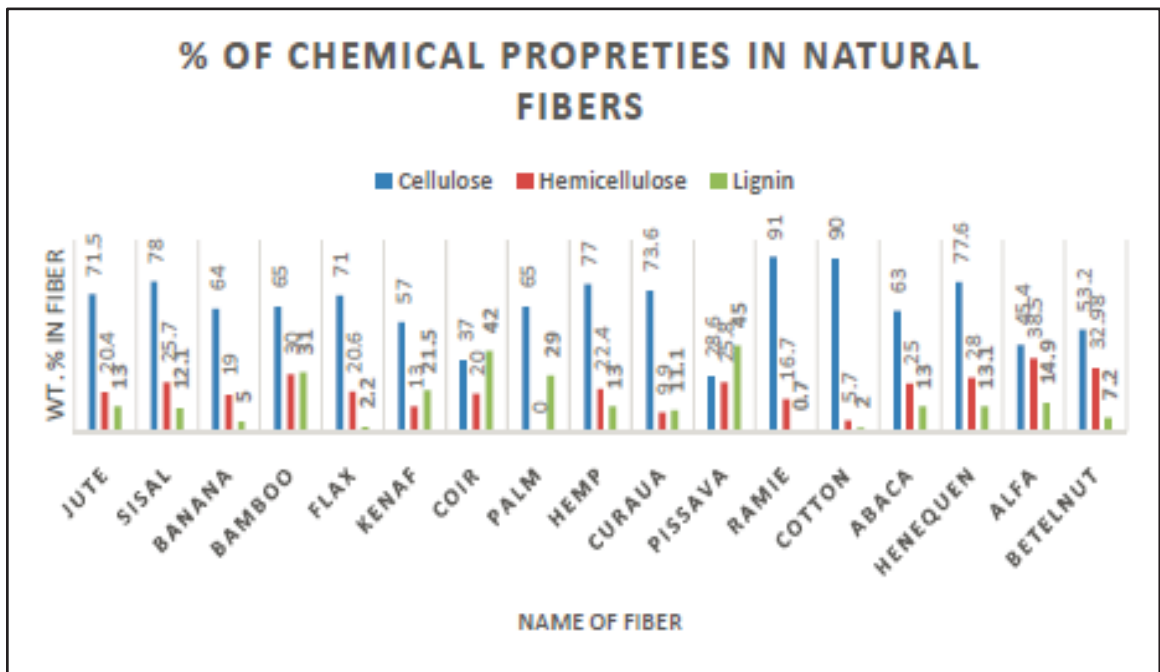


Figure I-9 : Propriétés chimiques des fibres naturelles [9]

Après avoir défini les fibres naturelles, tout en les comparant avec les fibres synthétiques, ainsi que quelques exemples de fibres naturelles et leurs compositions et propriétés chimiques (biodégradation médiocre (

Tableau I-4). [9].

Tableau I-5 et Figure I-9) la section suivante va définir les fibres de bouleau qui sont les fibres naturelles utilisées dans cette étude ainsi que leurs propriétés mécaniques.

I.1.1.4.2 Fibre de bouleau

Le bouleau est une sorte d'arbre de la famille des Bétulacées. Ce très grand arbre, qui peut mesurer jusqu'à trente mètres de hauteur et 120 cm de diamètre, est originaire du nord-est de l'Amérique du Nord. C'est le plus grand bouleau de l'est du Canada. Il peut vivre jusqu'à 150 ans et même parfois plus. Ses branches ont une saveur mentholée et ses sommets sont caractérisés par deux couleurs : brun et jaune foncé. Son bois est dense et lourd et il est facile à teindre et à polir. Le bouleau jaune, également connu sous le nom de cerisier, est l'un des bois durs les plus demandés (Figure I-10). Son bois au grain serré est très résistant aux chocs et il est destiné à la fabrication d'armoires, de boiseries, de portes et de planchers.

Selon le climat et le sol, le bouleau jaune commence à produire des semences entre 10 et 40 ans et il en produira quasiment tous les ans. Cependant, des périodes sans production peuvent survenir et durer jusqu'à 5 ans. [15] [16]



Figure I-10: Le bouleau jaune [15]

Les fibres de bouleau jaune se distinguent par une faible densité et un bon module d'élasticité en comparaison avec les autres types de fibres naturelles. Le Tableau I-6 présente quelques propriétés des fibres de bouleau.

Tableau I-6: Propriétés des fibres de bouleau [17]

Fibre	Densité (g/cm ³)	Conductivité (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Chaleur spécifique mesurée à 17°C (J Kg ⁻¹ K ⁻¹)	Module de cisaillement G	Coefficient de poisson ν	Module d'élasticité E1 (GPa)
Bouleau jaune	0.62	0.15	1300	0.94	0.45	13.9

I. 2 Problématique

L'usage intensif de matériaux plastiques pose des problèmes durables, de l'épuisement des ressources pétrolières non renouvelables et de la pollution, d'où la nécessité de choisir des matériaux qui ont des avantages par rapport aux matériaux métalliques malgré leurs multiples avantages dans la fabrication.

Ce sont les matériaux plastiques et composites qui représentent une meilleure alternative des matériaux métalliques en introduisant des fibres naturelles. Plusieurs études ont été effectuées sur ces matériaux pour déterminer leurs comportements tribologiques, mais les chercheurs relèvent un grand défi pour la validation dans l'application industrielle.

Ce projet vise à établir l'utilisation d'un biocomposite réalisé avec un thermoplastique d'origine bio ou non, mélangé à des fibres naturelles, afin de fabriquer les engrenages. Cependant, l'influence des performances de tribologie sur ces engrenages en fonctionnement, particulièrement l'usure sur le profil actif, n'est pas encore élucidée et ce projet de maîtrise se propose de l'étudier.

I.3 Questions de la 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?
- Quelle est la caractérisation dimensionnelle de l'usure sur les profils actifs des engrenages?

I.4 Objectif de la recherche

Ce projet vise à la mise en œuvre des performances de tribologie des engrenages en composites et l'étude de la résistance à l'usure en termes métrologiques.

- Actualisation d'une étude expérimentale analytique de tribologie en roulement/glissement combiné sur des éprouvettes en composite.
- Caractérisation dimensionnelle de l'usure et l'étude de l'influence de la valeur des paramètres de fonctionnement sur le comportement en tribologie.
- Évaluation de l'usure en tout point du profil actif.

Le but ultime de cette recherche est d'arriver à la comparaison avec les modèles analytiques ou numériques.

I.5 Contenu du mémoire

Le premier chapitre présente le sujet du mémoire ainsi qu'une définition générale des engrenages et des matériaux plastiques et composites et leurs utilisations dans ces engrenages. Il définit aussi les fibres naturelles en général et les fibres de bouleaux en particulier. Ensuite, le deuxième chapitre est consacré à la tribologie des matériaux composites et leurs modes d'endommagements en définissant l'usure, ses équations et ses méthodes de mesures. Par la suite, une revue de littérature sur le comportement tribologique des engrenages polymères et composites. La méthodologie utilisée sera détaillée dans le troisième chapitre. Dans cette section seront présentés les matériaux, la préparation des échantillons, le dispositif de fonctionnement et le plan d'expérience. Le quatrième chapitre présente la méthode utilisée pour mesurer l'usure

sur les différents échantillons, les résultats expérimentaux, une brève discussion et finalement une conclusion générale.

CHAPITRE II – CADRE THÉORIQUE ET RECENSION DES ÉCRITS

II.1 Cadre théorique

II.1.1 Tribologie des matériaux pour les engrenages

La tribologie est la science qui étudie la conception, l'usure, le frottement et la lubrification de surfaces en mouvement les unes par rapport aux autres. Divers

composites polymères ont été récemment exploités dans des domaines tribologiques, mais il demeure un grand manque de connaissances sur leurs comportements tribologiques.[10]

La tribologie peut causer d'énormes pertes économiques pour un système mécanique si elle n'est prise en compte dans la conception. En effet, elle peut avoir pour conséquences une augmentation dans les coûts de production et un engendrement des retards. [18]

Plusieurs recherches en tribologie ont été faites sur les polymères et les composites à fibres naturelles. En effet, chaque étude contient ses propres matériaux, paramètres de fonctionnement et essais expérimentaux. Cependant, les fibres de bouleau sont rarement étudiées.

II.1.2 Mode d'endommagement des engrenages en plastique

On distingue plusieurs modes d'endommagement : plastique, thermique, fatigue et usure.

Cependant, chaque mode a son dommage propre à lui, mais ils ont un dommage en commun : le surfacique. D'où la nécessité de donner une importance à la surface des dents d'engrenages (Figure II-1).

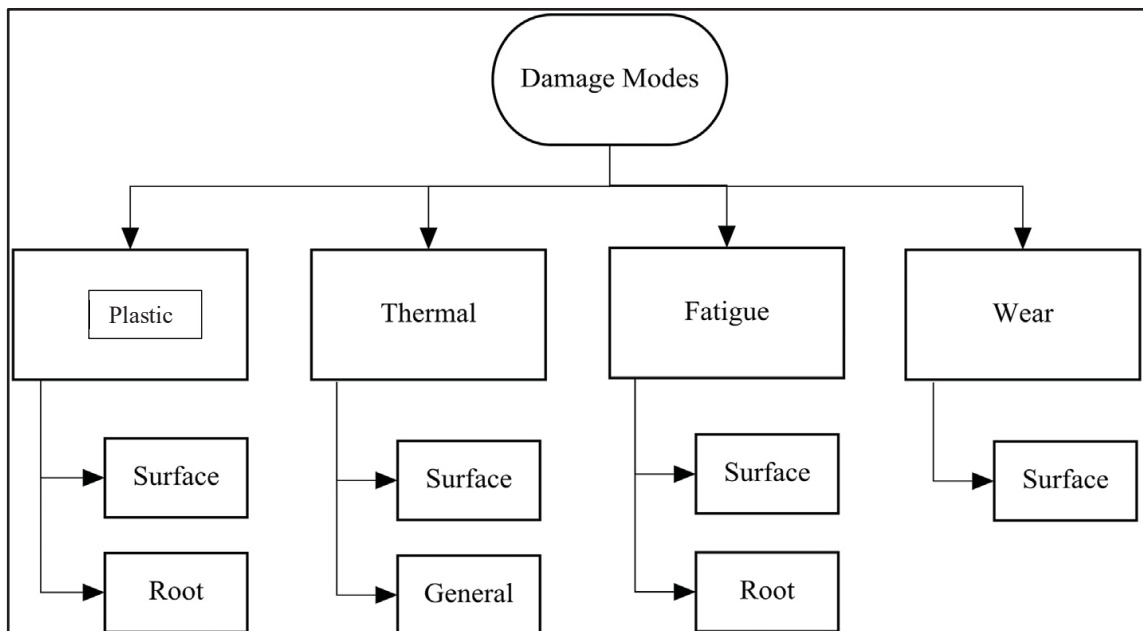


Figure II-1: Modes d'endommagements des engrenages [19]

Le chapitre présentera, par la suite, une définition sur le frottement et l'usure dans les engrenages ainsi que les équations de l'usure et ces méthodes de mesure. Le chapitre se termine par une présentation des études faites sur les engrenages en plastique et en composites pour déterminer leurs comportements tribologiques.

II.1.2.1 Frottement

Le frottement représente la résistance au mouvement relatif d'un corps contre un autre. Il est dit statique quand il n'y a aucun mouvement relatif entre deux solides en contact, tandis que le frottement est dit cinématique quand il existe un mouvement relatif entre ceux-ci.

Le frottement plastique correspond à la force de frottement exercée de sorte que le solide se déplace et que la force requise pour le conserver en mouvement est inférieure à celle qui existe entre le repos et le mouvement.

Le coefficient de frottement est le rapport entre la force de frottement (F) et la force normale (W) qui existe entre deux surfaces, d'où :

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (II.1)$$

Le coefficient de frottement dépend de plusieurs paramètres tels que l'environnement (milieu, lubrifiant, etc.), le fonctionnement (mouvement, vitesse, géométrie, etc.), le matériau (propriétés mécaniques, thermiques, etc.) et la tribologie (coefficient de frottement, usure, etc.). [18]

II.1.2.2 L'usure

L'usure est l'élimination de la matière d'un ou deux matériaux qui sont en contact à l'état solide. Elle est quantifiée par le terme « taux d'usure » qui est défini comme la masse, le volume ou la perte de hauteur du matériau enlevé par unité de temps ou de distance de glissement. [20]

Il est préférable que le taux d'usure des corps en contact soit minimal dans les applications commerciales afin de garantir la longévité du système, de l'équipement ou de la machine. [21]

Le comportement à l'usure des composites est influencé par plusieurs paramètres tels que les types des matériaux de base utilisés, les charges, le traitement des fibres, la fraction de fibres et un processus de développement du composite utilisé. [13]

On distingue cinq types d'usures (Figure II-2) :

L'usure adhésive : elle est due au transfert de matériau d'une surface à une autre. En effet elle se produit lorsque deux métaux de composition chimique similaire sont en contact ou lorsque la surface de contact est sans couche d'oxyde.

L'usure abrasive : Les particules dures qui glissent sur la surface en contact entraînent l'abrasion. En effet, le matériau se déplace en formant une rainure avec ou sans enlèvement de la matière.

L'usure érosive : elle est due à l'interaction mécanique entre le solide et le liquide ou l'impact de liquide ou de particules solides avec une vitesse sur la surface du matériau.

L'usure par frottement : Elle est due à un mouvement alternatif entre deux solides où l'on distingue deux phases : frottement de deux surfaces, puis oxydation à cause de l'énergie emmagasinée dans les particules.

L'usure par fatigue/délamination : elle est engendrée par la rupture résultante de la fatigue de surface due à la charge cyclique, ceci cause une fissure qui se propage et génère de petites particules d'usure. [20, 22]

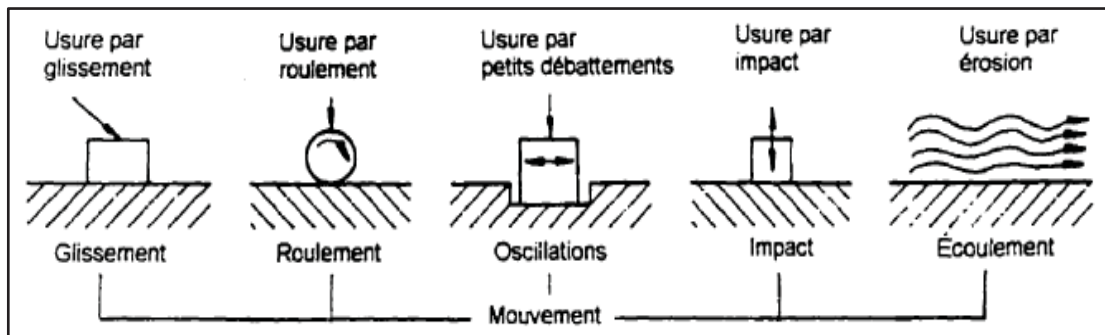


Figure II-2: Classement des processus d'usure en fonction du mouvement du corps [22]

L'usure peut se diviser en usure douce et en usure sévère. L'usure douce est présente sous de faibles charges et leurs débris sont constitués de fines particules. L'usure sévère se voit lorsqu'il y a des pressions supérieures où l'on trouve une déformation plastique au-dessous de la surface.[22]

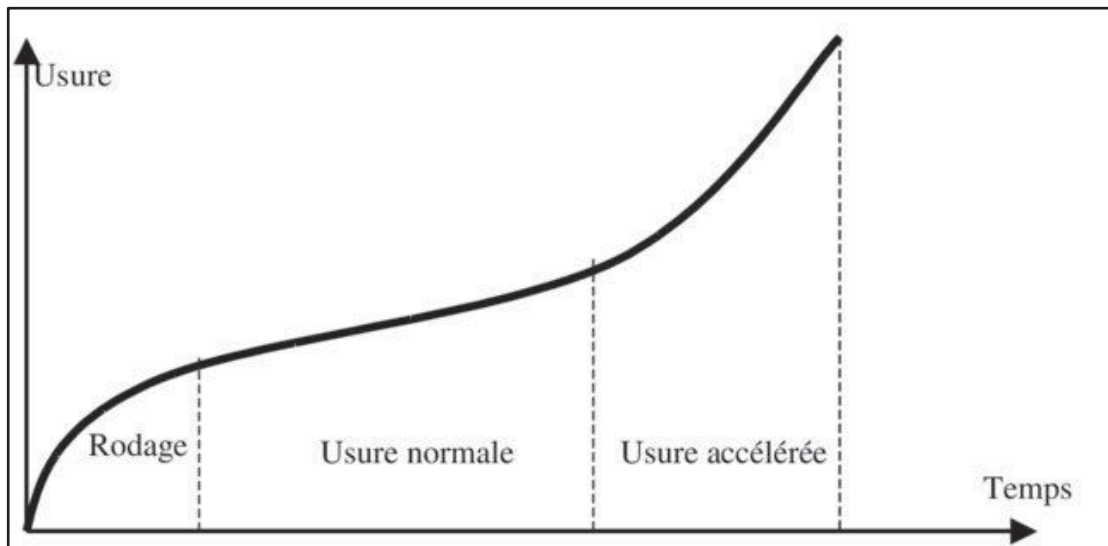


Figure II-3: Évolution de l'usure en fonction du temps [23]

Une pièce soumise au frottement rencontre trois périodes dans l'usure. (Figure II-3). [24]:

- **Rodage** : usure sensible au début, mais diminue progressivement
- **Marche normale** : usure très faible et constante
- **Viellissement et mort** : l'usure commence à croître

II.1.3 Équations de l'usure

La littérature comporte plusieurs articles sur les modèles et les équations de l'usure. Ces derniers ont changé avec le temps et en fonction de la technologie. Cependant, elle ne se base pas sur des lois fondamentales de la science même si ces équations peuvent prédire le taux ou la quantité d'usure.[25]. Plusieurs modèles de loi, qui ont été élaborés, varient avec différentes conditions d'essais.

Archard [26] a développé plusieurs lois de l'usure, une des équations qui sort de l'expérimental est :

$$V_u = a \times F_n \times L \quad (\text{II.2})$$

Tel que V_u est le volume usé, F_n la force nominale et L la distance de glissement.

Une deuxième équation qui prend en compte la limite d'écoulement du matériau σ_y :

$$V_u = b \times \frac{F_n \times S}{\sigma_y} \quad (\text{II.3})$$

Avec S la surface de contact et a et b sont les coefficients de calage.

La plupart des équations établies sur l'usure prennent un cadre théorique et ne prennent pas en considération les tests expérimentaux ainsi que les paramètres du matériau utilisé.

Meng et Ludema [27] ont aussi prouvé des lois de l'usure avec plusieurs variables qui entrent dans l'usure, mais ces lois sont difficiles à utiliser puisqu'elles sont valables que pour des tests spécifiques.[28]

II.1.4 Usure des dents sur des engrenages droits

L'usure constitue un mode de défaillance présent généralement dans les transmissions par engrenages. On trouve plusieurs éléments qui entrent dans le comportement à l'usure comme le chargement, la géométrie et la lubrification.

La littérature comporte plusieurs études sur l'usure des engrenages. Ces travaux se basent généralement sur deux genres d'essais : par disque ou par engrenages sur un banc d'essai. Le comportement à l'usure des engrenages donne une meilleure idée sur la forme de la dent après essai. Ce qui montre la perte de profondeur au niveau

du flanc de la dent d'engrenage. Le taux d'usure est mesuré en temps réel par la machine ou après arrêt. [29]

II.1.5 Méthode de mesure de l'usure

Le taux d'usure peut être exprimé en termes de perte de masse, réduction de longueur ou perte de volume. Dans la littérature, les chercheurs définissent l'usure des engrenages comme un enlèvement de matière, mais la façon de l'évaluer est différente. Comme Zhang, Y., et al., [30] évaluent l'usure en termes de quantité de matière perdue sur la surface de contact des dents de l'engrenage durant le fonctionnement et elle est mesurée par un capteur de déplacement.

Brandão, J.A., et al [31] évaluent l'usure visuellement en termes de particules en utilisant la ferrographie. Mais Wright, N.A. et S.N. Kukureka [32] ont défini l'usure comme un déplacement qui a été mesuré par un transformateur différentiel variable linéaire (LVDT).

Lin, J., et al.[33] ont quantifié l'usure en termes de réduction de largeur de la dent d'engrenage à l'aide d'un profilomètre. Tandis que, Potapov, K.G [34] a utilisé un système de mesure à l'aide de capteurs qui enregistrent les impulsions qui sont numérisées par un convertisseur analogique numérique.

Pour **Evans, S.M. et P.S. Keogh [35]**, ils ont utilisé la microscopie électronique à balayage (MEB) qui permet de quantifier l'usure en termes microscopique.

La section suivante présente plusieurs études faites sur les polymères et les composites pour déterminer leurs comportements tribologiques.

II.2 Recension des écrits

II.2.1 Le comportement de tribologie des polymères

Cette partie est consacrée aux différents articles qui traitent le comportement des engrenages en polymère ainsi que la méthodologie appliquée pour définir l'usure sur ces matériaux. Elle va également définir les paramètres expérimentaux et les paramètres responsables de l'usure.

Li, W., Wood, A., Weidig, R., & Mao, K. (2011) [36] ont étudié le comportement à l'usure des engrenages en polymères (Acétal, Nylon 66, PEEK) avec les différentes spécifications (Tableau II-1) par des essais expérimentaux tout en changeant le type de polymère sur la roue menée et la roue menante.

Tableau II-1: Spécification des engrenages utilisés [36]

Module	Nombre de dents	Angle de pression	Largeur de la face	Jeu nominal	Épaisseur de la dent	Ratio de contact
2 mm	30	20	17 mm	0.18 mm	3.14 mm	1.65

Le tableau Tableau II-2 présente quelques propriétés mécaniques de l'Acétal, Nylon 66 et PEEK et leurs températures de fusion. La

Figure II-4 montre le banc d'essai utilisé pour effectuer les tests expérimentaux sur les engrenages.

Tableau II-2: Propriétés mécaniques de chaque matériau [36]

	Acétal	Nylon 66	PEEK
Gravité spécifique (g/cm ³)	1.41	1.14	1.32
Résistance en traction (MPa)	62	105	150
Module de flexion (MPa)	2600	2850	3500
Coefficient de frottement	0.21	0.28	0.21
Température de fusion (°C)	175	256	343

L'essai sur les engrenages a montré que premièrement pour les engrenages en acétal et en charge moyenne (entre 8,5 et 9 N.m) l'usure se divise en trois périodes : rodage, linéaire et usure finale rapide. Cependant, pour les charges supérieures à 9 N.m, l'usure a été rapide et la taille des particules usées est intéressante et enfin les dents ont fondu en impliquant une défaillance par flexion thermique.

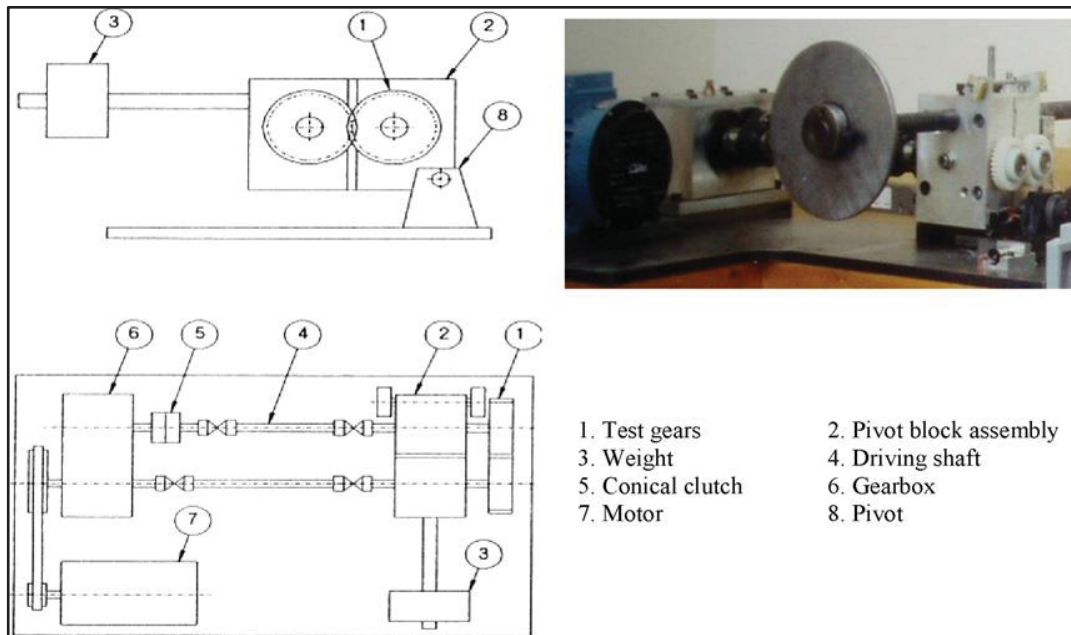


Figure II-4: Banc d'essai des engrenages [36]

Pour le nylon contre nylon, l'usure est faible et linéaire pour les couples inférieurs à 10 N.m, mais pour les couples supérieurs, l'usure se divise en deux phases : la phase de rodage qui est courte et la phase finale d'usure où le taux d'usure augmente rapidement due aux effets thermiques (Figure II-5).

Pour l'acétal contre nylon et nylon contre acétal, l'expérience montre que le matériau conducteur et le matériau conduit jouent un rôle dans les performances de l'usure.

En effet, quand l'acétal est utilisé comme menant, une augmentation des performances d'usure est observée par rapport à toutes les autres combinaisons. Ce qui n'est pas le cas quand le nylon est utilisé comme mené (Figure II-5).

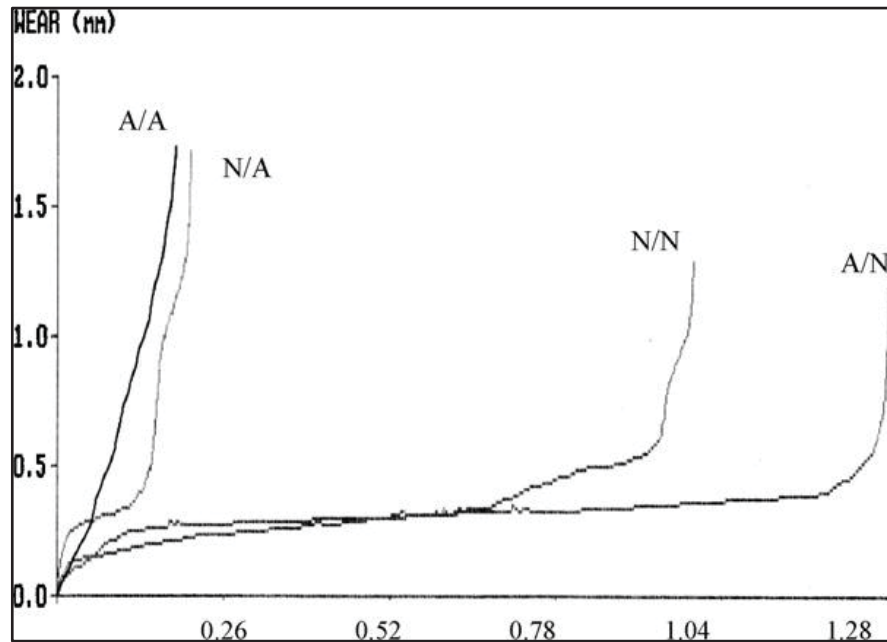


Figure II-5: L'usure du Nylon contre Acétal en comparaison avec N/N et A/A (cycles× 10⁶) [36]

Soudmand, B. H., & Shelesh-Nezhad, K. (2020) [37] ont étudié les caractéristiques de l'usure du nano-composite poly-butylène téréphtalate PBT. Ce dernier est mélangé avec le Montmorillonite (MMT) et nano-précipité de carbonate de calcium (NPCC) par extrusion pour avoir des échantillons à 2,4 et 6 % en poids de nanoparticules. Les engrenages utilisés possèdent les caractéristiques suivantes : angle de pression : 20° ; module : 2mm ; nombre de dents : 36 ; largeur de face : 14 mm (Figure II-6).

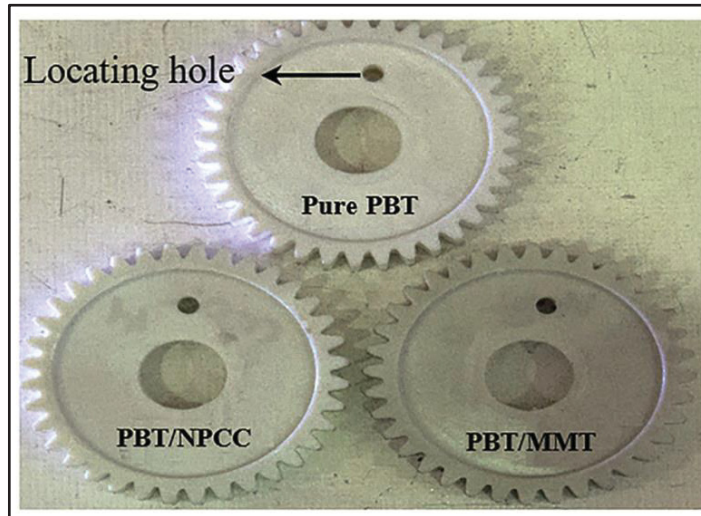


Figure II-6: les échantillons d'engrenages en plastique [37]

Pour une vitesse de rotation de 1000 tr/min et une durée de 20 minutes pour chaque niveau, correspondant à 20 000 cycles, et en augmentant la charge à chaque fois de 1Nm, tout en commençant par un couple initial de 4 Nm, les résultats de l'usure ont été observés par une caméra digitale. En effet, quatre dents consécutives de l'engrenage menant ont été choisies pour mesurer l'usure. (

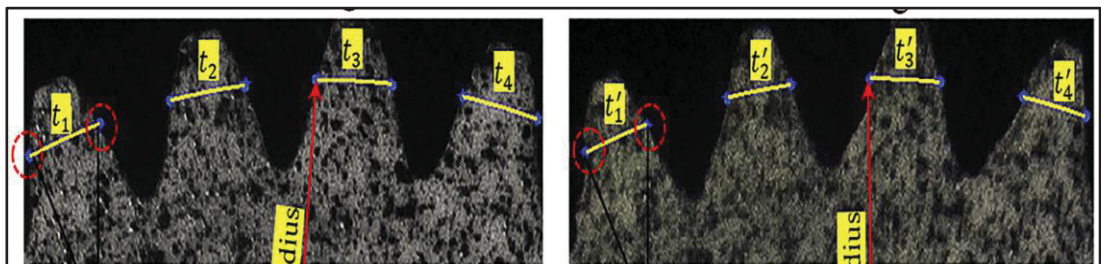


Figure II-7)

Figure II-7: Photos des engrenages par la caméra digitale [37]

La figure

Figure II-7 montre les points d'intersection pour définir la distance qui va permettre de calculer l'usure de la manière suivante :

$$\text{Usure} = \text{somme des } t_i - \text{somme des } t'_i \quad (\text{II.4})$$

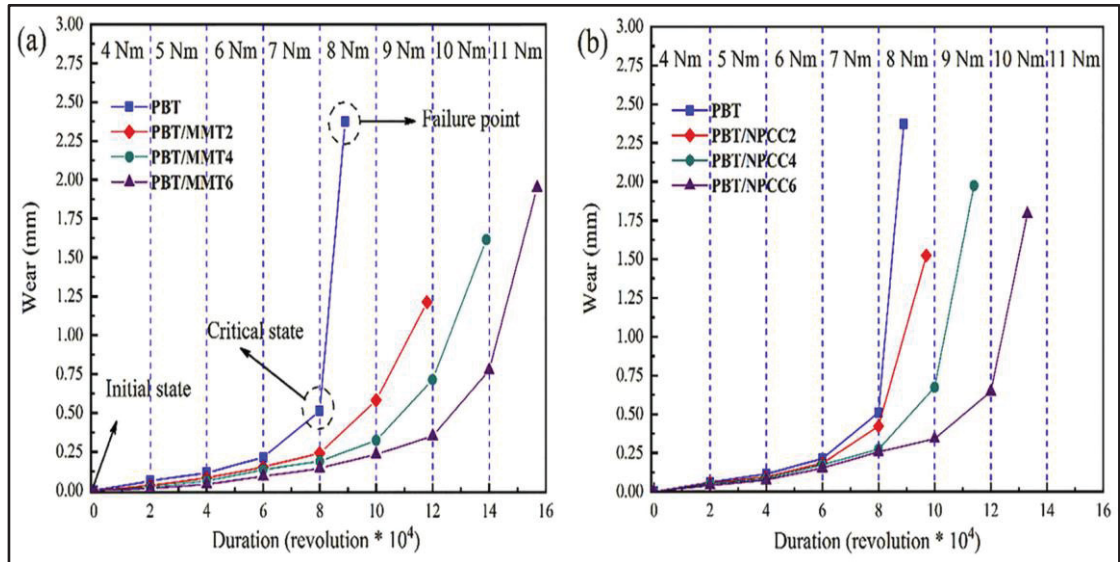


Figure II-8: Résultats d'usure pour les différents échantillons [37]

Les résultats montrent que l'usure pour le PBT et ses nano-composites est relativement faible à des charges inférieures à 7 Nm. À cette dernière, l'usure augmente remarquablement pour le PBT pur et cela revient généralement à l'augmentation de la température de surface dent. (

Figure II-8).

Pour les engrenages PBT/MMT, l'usure diminue systématiquement avec les ajouts d'argile ce qui indique une intercalation appropriée des feuilles d'argile dans la matrice PBT.

Pour les engrenages PBT/NPCC, l'inclusion de 2 % en poids de NPCC n'a pas déplacé le couple critique par rapport à celui du PBT pur, mais la défaillance a eu lieu à des cycles plus élevés. L'usure pour les engrenages PBT/NPCC a

diminué tout comme pour le PBT/MMT, mais pour les mêmes couples et temps de cycles, les engrenages PBT/MMT présentaient une résistance à l'usure plus élevée que les engrenages PBT/NPCC PBT NPCC (

Figure II-8).

Figure II-8 Singh, P. K., Siddhartha, & Singh, A. K. (2018) [38] ont étudié le comportement thermique de l'usure des engrenages cylindriques à base de polymères (l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), polyéthylène haute densité (PEHD) et polyoxyméthylène (POM)).

Les polymères sont utilisés dans les roues menées tandis qu'un métal (AISI 1040) a été utilisé dans la roue menante. En utilisant à chaque fois une vitesse de rotation de 600, 800, 1000 et 1200 tr/min ainsi qu'un couple qui varie de 0.8, 1.2, 1.6 et 2 Nm et pour 1.2×10^5 cycles. On obtient les résultats suivants (

Figure II-9).

Pour un couple de 0.8 Nm et une vitesse de rotation de 600 tr/min, le taux d'usure de l'ABS est plus important par rapport eu HDPE et le POM.

À 2.0 Nm et 600 tr/min, une défaillance de l'ABS, et a 2.0 Nm et 1200 tr/min. Une augmentation du taux d'usure pour le HDPE de 276 % en comparaison avec le POM.

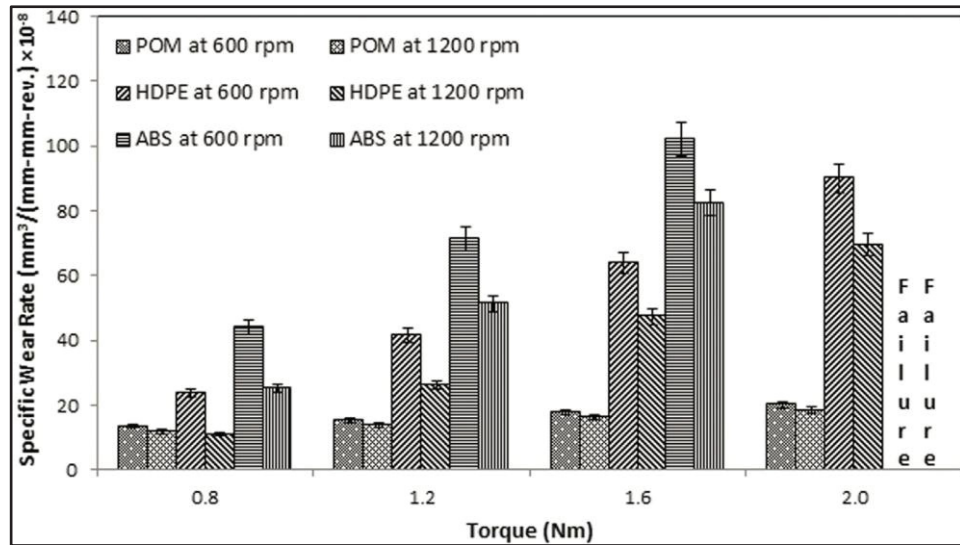


Figure II-9: Résultats du taux d'usure de chaque matériau en fonction du couple (à 600 tr/min et 1200 tr/min) [38]

Pour une vitesse de 900 tr/min et un couple de 1.4 Nm, les résultats ont montré que la diminution de l'épaisseur de la dent d'ABS est plus importante en comparaison avec le HDPE et le POM (Figure II-10).

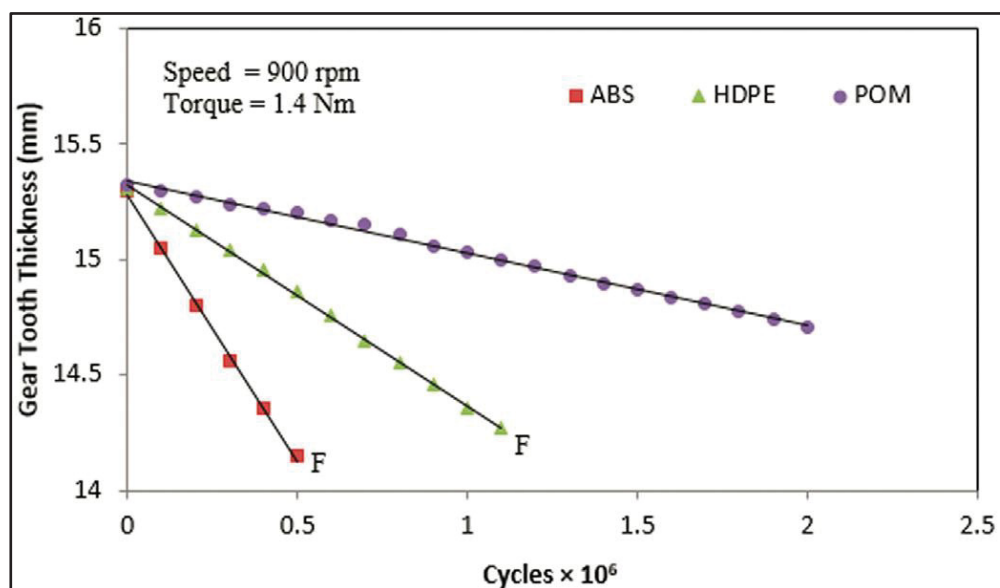


Figure II-10: Variation de l'épaisseur des dents en fonction de nombre de cycles [38]

Mao, K., Greenwood, D., Ramakrishnan, R., Goodship, V., Shroufi, C., Chetwynd, D., & Langlois[39] ont étudié le comportement à l'usure des engrenages en POM (polyoxyméthylène) non renforcé et des engrenages en POM renforcé de fibres de verre. Le moulage effectué est par injection pour avoir les différents échantillons (Figure II-11).

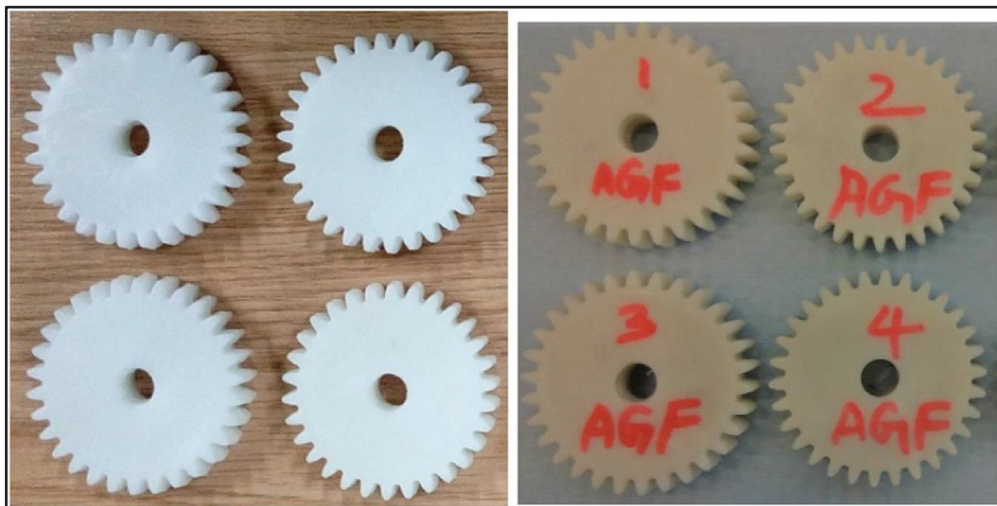


Figure II-11: Les échantillons de POM et GFR POM [39]

Les engrenages ont été étudiés sur un banc d'essai et le taux d'usure est mesuré par l'enregistrement du mouvement du bloc de roulement à l'aide d'un transducteur différentiel variable linéaire connecté à un système d'enregistrement des données. Ce qui permet d'exprimer l'usure en termes de réduction de l'épaisseur de la dent au point primitif.[39]

Les engrenages ont été testés dans le banc d'essai (Figure II-12) avec un couple initial de 6 Nm en l'augmentant à chaque fois de 1 N.m et pour 20 000 cycles à chaque couple.

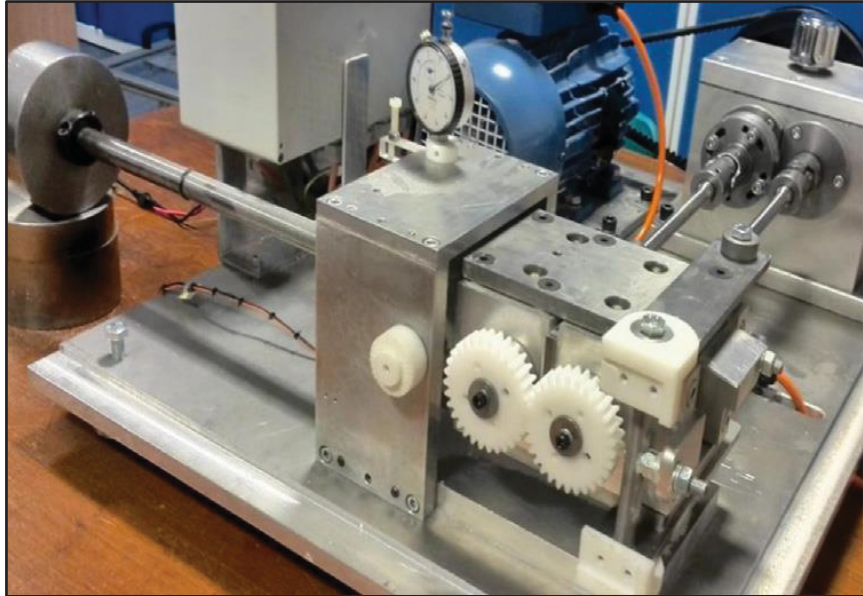


Figure II-12: Banc d'essai pour les engrenages [39]

Les résultats obtenus montrent que l'usure augmente lentement avec chaque niveau de couples jusqu'à la valeur de 11N.m. Ensuite, elle augmente significativement parce que la température est importante ce qui cause la fusion et la flexion de la dent (Figure II-13).

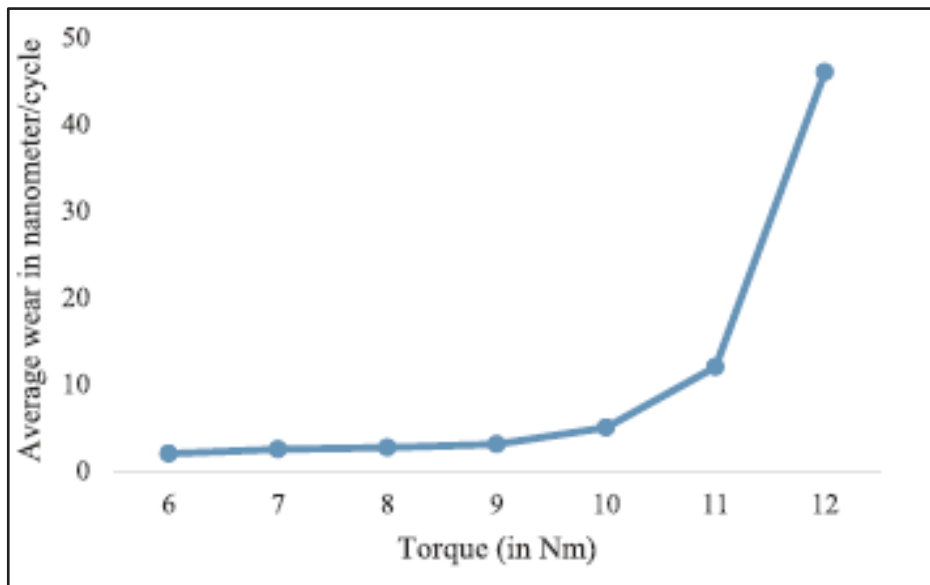


Figure II-13: Le taux d'usure pour POM GFR en fonction de la charge [39]

En conclusion, les engrenages en POM renforcé de fibres de verre donnent de meilleurs résultats par rapport au POM non renforcé et il est remarqué qu'il y a une transition de charge pour les deux types d'engrenages.

II.2.2 Le comportement de tribologie des composites à fibres naturelles

Cette partie va traiter plusieurs articles qui étudient le comportement des composites à fibres naturelles. En effet, peu de travaux sont effectués pour ces types de matériaux. Cette partie traitera également de la méthodologie appliquée pour définir l'usure sur ces matériaux, les paramètres expérimentaux et les paramètres responsables de l'usure.

Yousif, B., & El-Tayeb, N. s. M. (2007) [40] ont étudié l'effet des fibres de palmier à huile sur les performances tribologiques du composite en polyester. Premièrement, les fibres extraites ont été préparées et coupées pour avoir des longueurs de 1 à 1,5 cm dont les propriétés mécaniques sont présentées dans le Tableau II-3.

Tableau II-3 : Propriétés de la fibre de palmier à huile [40]

Résistance à la traction	Allongement à la rupture	Module d'élasticité
65 — 70 MPa	12–16.2%	0.57–0.59 GPa

La machine pour tester les composites contient une surface d'appui en acier. Cette dernière a été meulée et polie à l'aide d'un papier abrasif avec une rugosité de surface d'environ 0,06 μm Ra et les échantillons ont été frottés pour assurer un contact rapproché entre la face coulissante de l'échantillon et la surface d'appui en acier inoxydable.

Les composites sont préparés à l'aide du moulage sous pression du polyester et les fibres de palmier. Des essais de glissement à sec ont été effectués en conditions ambiantes pour diverses distances de glissement (0 à 5 km), vitesses de glissement (1,7, 2,8 et 3,9 m/s) et sous charge (30, 50, 70, and 100 N).

Les résultats des tests de glissement à sec sur les composites se divisent en deux parties.

La première partie présente l'effet de la distance de glissement, de la charge appliquée et de la vitesse de glissement sur la tribologie du PRPH composite et du polyester pur.

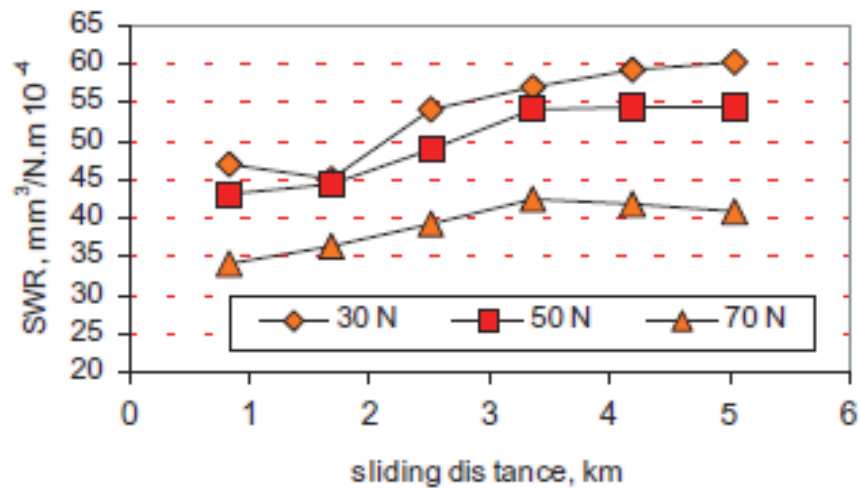


Figure II-14: Résultats de l'usure en fonction de distance de glissement pour le PRPH [40]

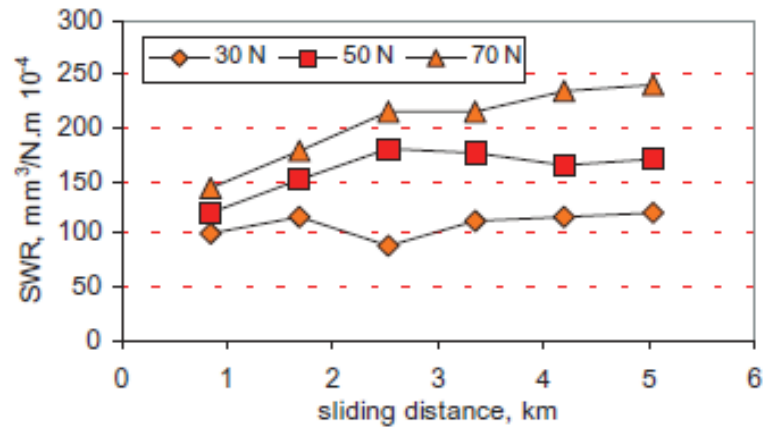
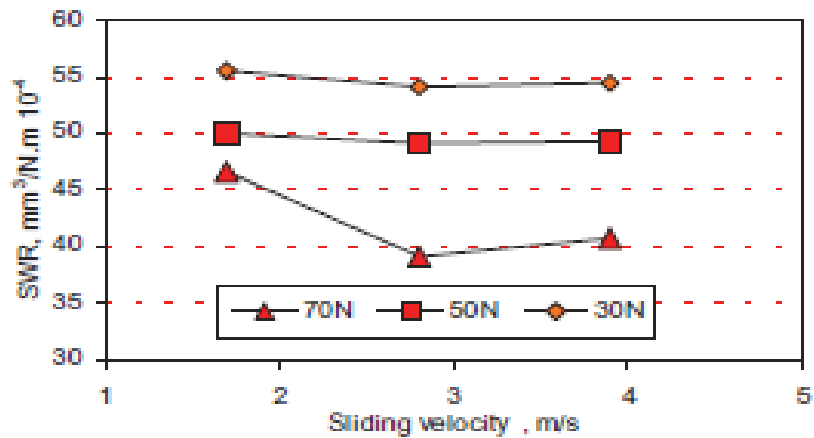


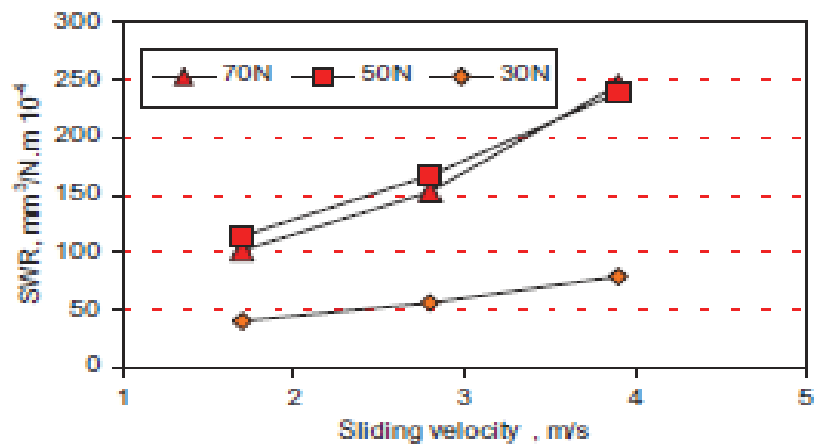
Figure II-15: Résultats de l'usure en fonction de distance de glissement pour le polyester pur [40]

Il est constaté que le taux d'usure augmente linéairement avec la distance d'usure jusqu'à une distance de 3 km ensuite il se stabilise.

La présence des fibres de palmier à huile améliore les propriétés d'usure du polyester. En effet, la Figure II-15 montre que le taux d'usure est plus important dans le polyester pur que dans le composite OPRP. (Figure II-14)



(a)



(b)

Figure II-16: Résultats de l'usure en fonction de la vitesse de glissement [40]

La deuxième partie des résultats montre l'effet de la vitesse de glissement sur le taux d'usure. La Figure II-16 indique qu'à faible vitesse, le taux d'usure est moins élevé pour les composites à fibres de palmier, ce qui n'est pas le cas pour le polyester pur.

En conclusion, l'effet des paramètres de mesure sur le taux d'usure du composite et du polyester pur n'est pas semblable. En effet, le taux d'usure du composite est inférieur à celui du polyester, ce qui justifie que les fibres de palmier améliorent les propriétés d'usure pour le composite.

El-Tayeb, N. S. M. (2008) [41] ont étudié le taux d'usure et le coefficient de frottement des composites de polyester renforcé de fibres courtes de canne à sucre (C-PRSC) et de polyester renforcé de fibres courtes de verre (C-PRG) dont les différentes longueurs et propriétés sont présentent dans le Tableau II-4.

Tableau II-4 : Propriétés des fibres de canne à sucre et des fibres de verre [41]

	Sugarcane fibre	Glass fibre-R
Length (mm)	103–126	30–50
Weight (mg)	2–6	1–2
Tex (mg/mm)	(1.94–4.76)E-02	(3.4–6)E-02
Diameter (mm)	1.2–2.7	0.5–0.8
Tensile strength (GPa)	0.17–0.29 [25]	3.5 [26]
Modulus of elasticity (GPa)	15–19 [25]	73[26]

Après l'extraction de fibres de canne à sucre, la préparation du composite a été faite dans un laboratoire à l'aide d'un moule en acier. Les fibres coupées en 1, 5, 10mm de longueur ont été imprégnées de résine tout en mélangeant l'ensemble à la main pour avoir un composite uniforme mesurant 11mm x 11mm x 20mm. Le composite de polyester renforcé de fibres de verre a été fabriqué suivant la même procédure que celle utilisée pour le C-PRSC.

El-Tayeb, N. S. M. (2008) ont effectué des tests sur les deux composites C-PRSC et C-PRG. Les essais de glissement à sec ont été effectués pour diverses charges (20, 40, 60, 80 N) et avec une vitesse de 2.5 m/s pour une durée 1800 s (

Figure II-17).

Le premier essai est appliqué afin de définir l'effet de la charge et de la longueur des fibres sur le comportement en frottement et en usure. Le deuxième essai est effectué pour déterminer l'effet de l'orientation des fibres sur le comportement tribologique de ces matériaux.

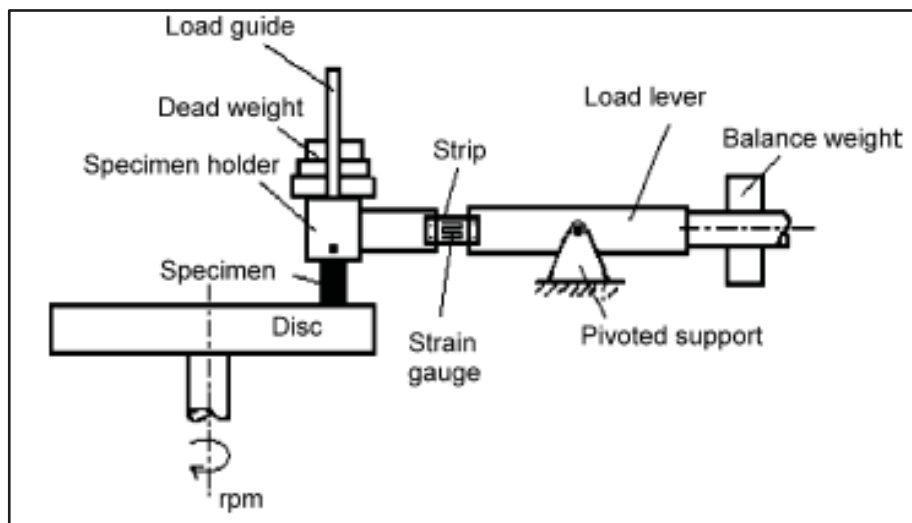


Figure II-17: Schéma du banc d'essai [41]

Les figures

Figure II-18 et

présentent respectivement les courbes du comportement du coefficient de frottement et le taux d'usure en fonction de la charge pour le PRG et PRSC.

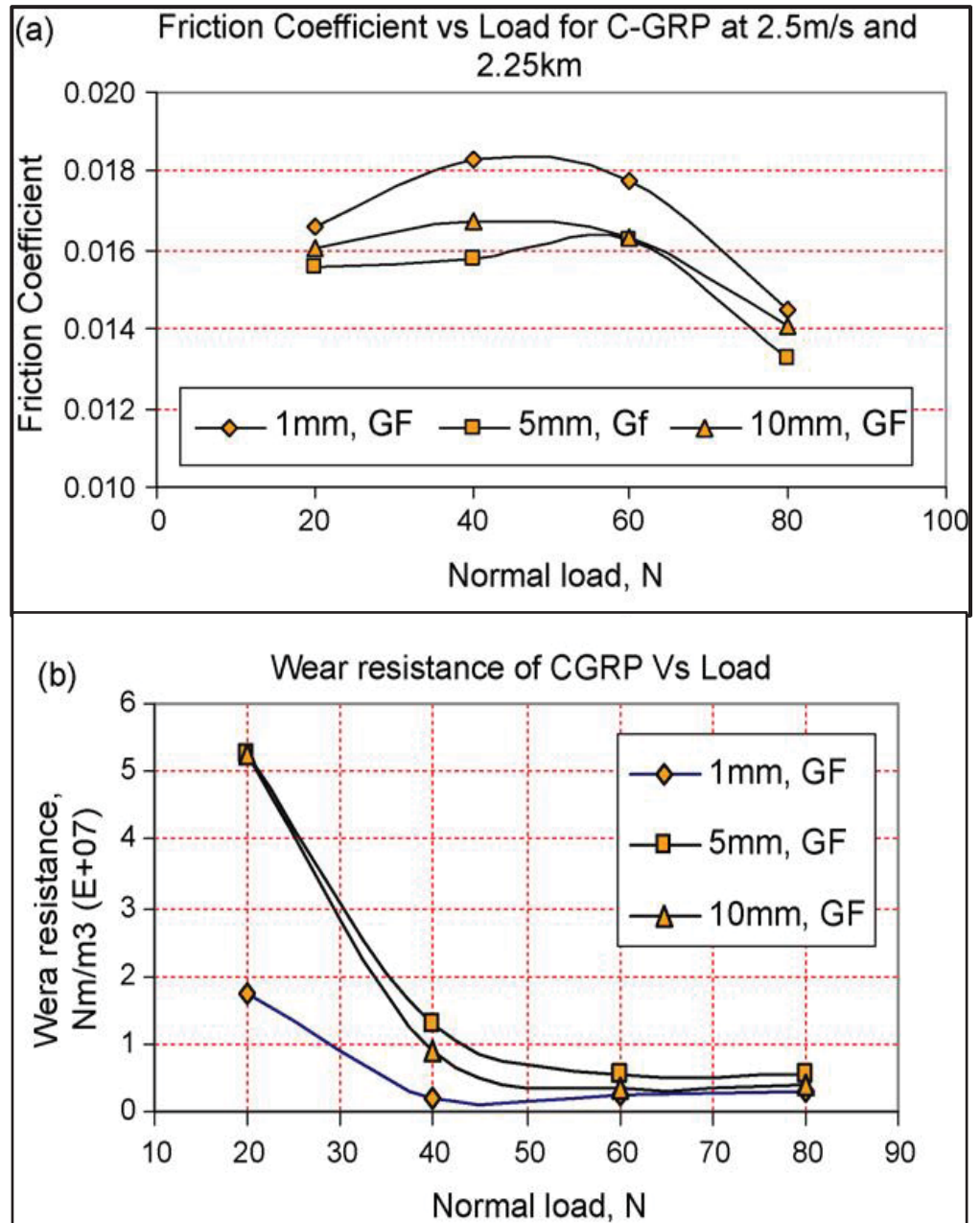


Figure II-18: Résultats du coefficient du frottement et de l'usure pour le PRG en fonction de la charge [41]

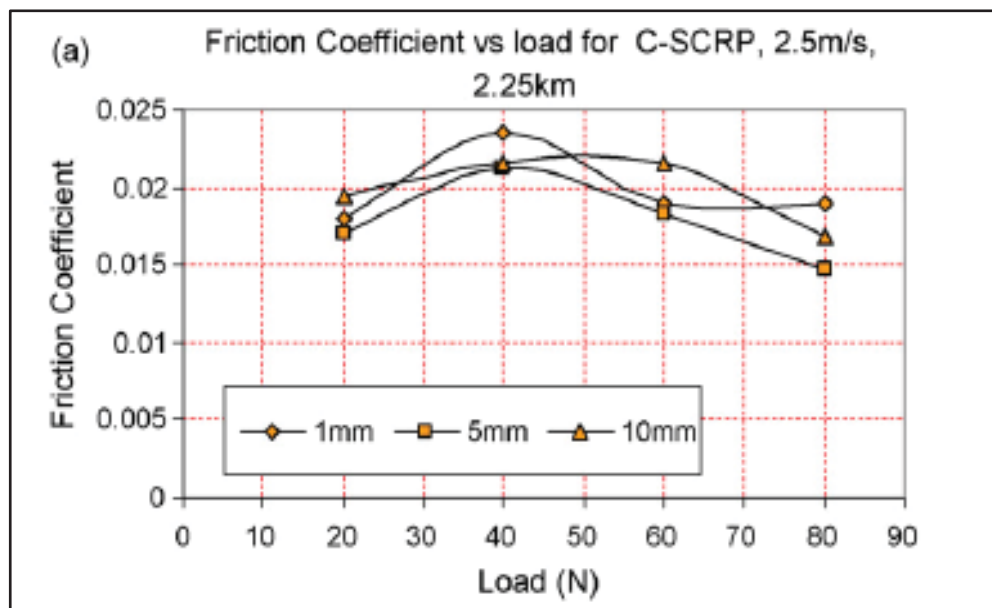
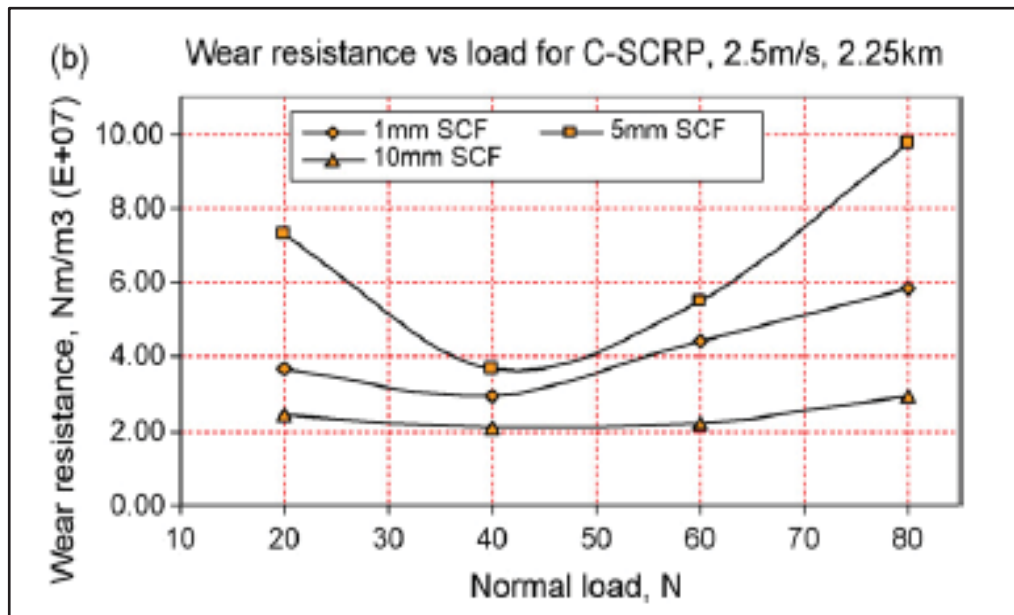


Figure II-19: Résultats du coefficient du frottement et de l'usure pour le PRCS en fonction de la charge [41]

Les résultats ont montré que le composite en polyester, renforcé de fibres de canne à sucre PRSC, présente une bonne résistance à l'usure et un meilleur coefficient de frottement en comparaison avec le polyester PRG renforcé de fibres de verre lors du glissement contre l'acier inoxydable.

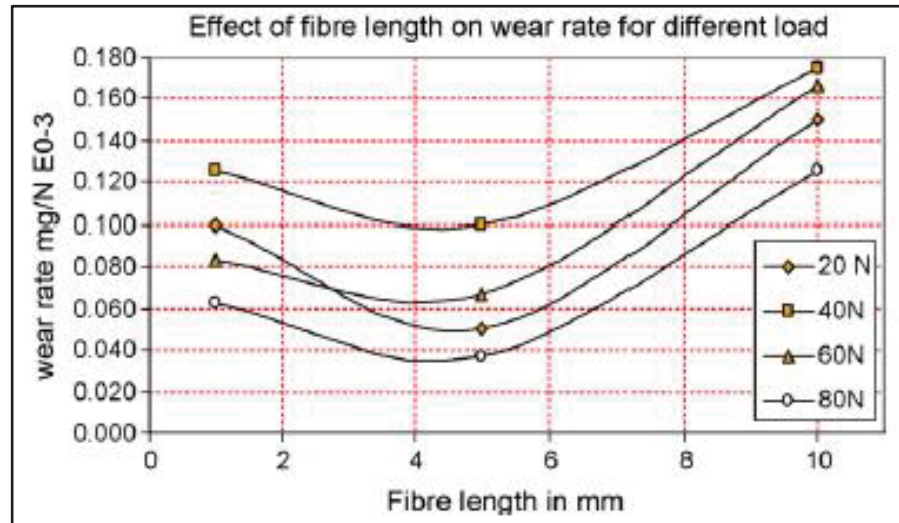


Figure II-20: Résultats de l'usure en fonction de la longueur de fibre [41]

Avec l'augmentation de la longueur de fibre de 1 à 5 mm, le taux d'usure diminue, puis augmente à la longueur de fibre de 10mm. En effet, il existe une longueur de fibre critique (près de 5 mm) où le taux d'usure est minimal (Figure II-20).

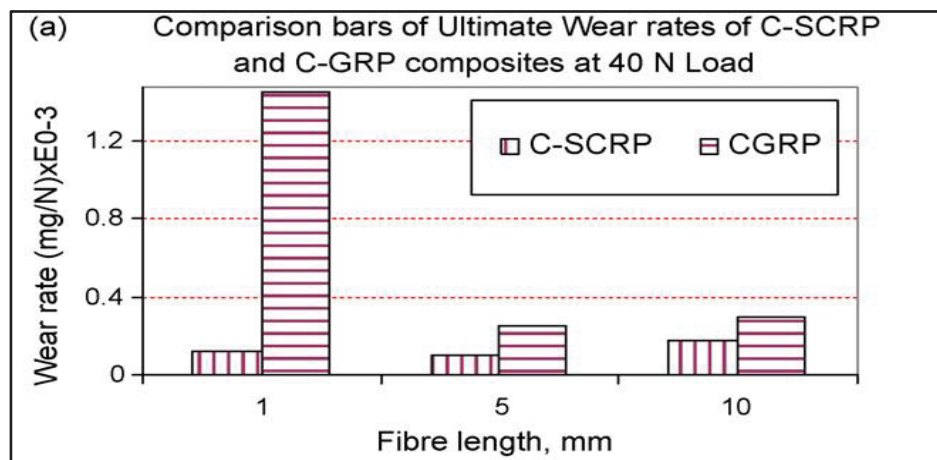


Figure II-21: Comparaison de l'usure du PRCS et PRG en fonction de la longueur de fibre [41]

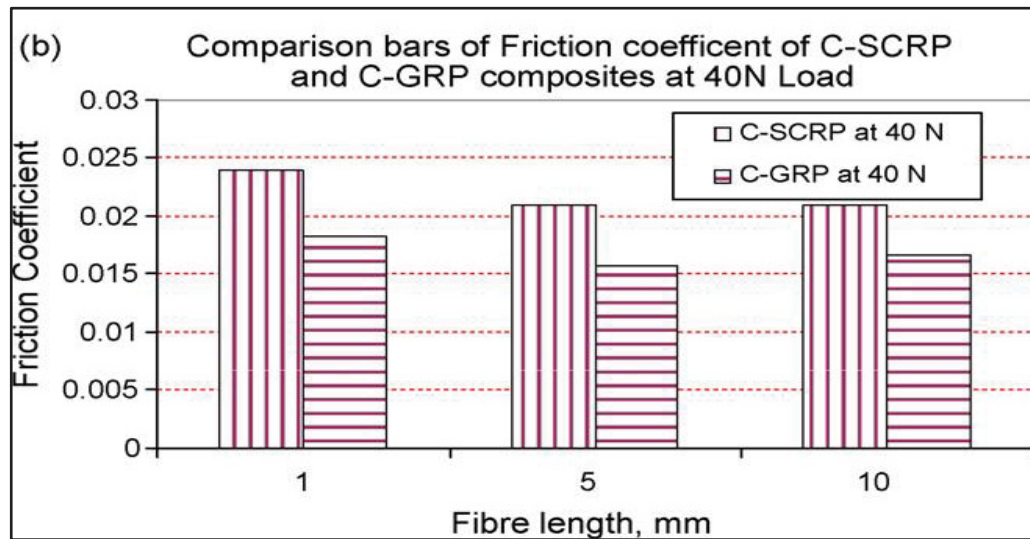


Figure II-22: Comparaison de l'usure et du coefficient de frottement du PRCS et PRG en fonction de la longueur de fibre [41]

Le composite C-PRSC a montré une amélioration du taux d'usure par rapport au composite C-PRG pour différentes longueurs de fibres (

Figure II-21 et Figure II-22).

Sharma, A., Suresh, S., & Dubey, A. (2012) [42] ont étudié les propriétés et les caractéristiques du composite renforcé de fibres de sisal. Ces dernières ont été coupées en feuilles et nettoyées avec de l'éthanol pour enlever les impuretés. Les échantillons ont été préparés pour avoir de différentes proportions de fibres, c'est-à-dire 0 %, 10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %. L'échantillon est testé et caractérisé dans le testeur de résistance à l'usure.

Les résultats présentent que la variation du taux d'usure augmente avec le temps. Cependant, le taux d'usure diminue lorsque la concentration de fibres de sisal augmente à 60 %, ensuite il augmente au fur et à mesure que la concentration de sisal augmente. Ce qui montre qu'il y a un pourcentage de fibre optimal pour le composite où le taux d'usure est minimal (Figure II-23).

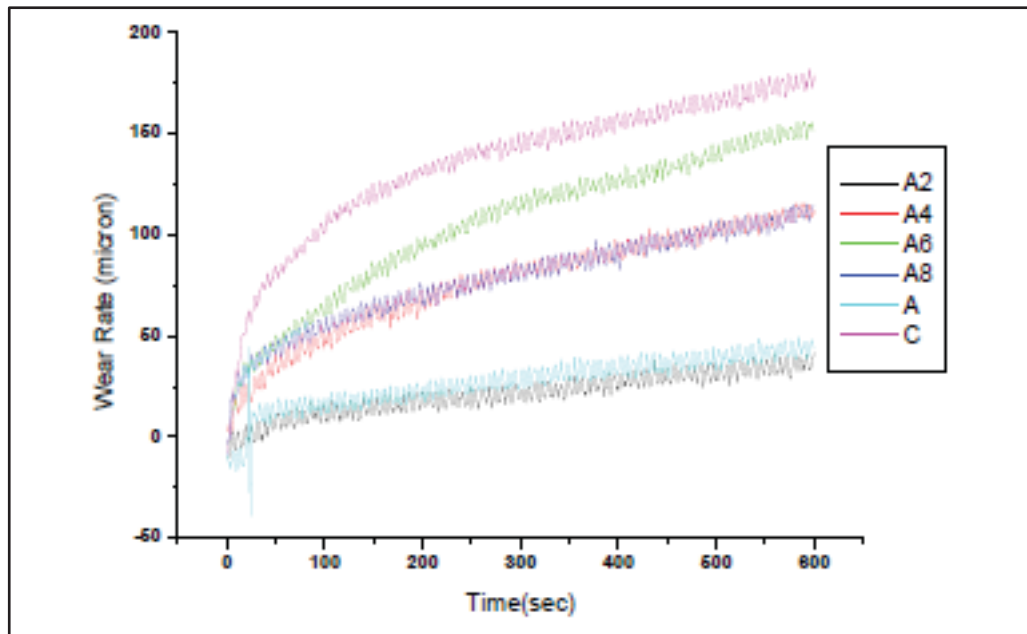


Figure II-23: Le taux d'usure en fonction du temps tel que A2 : composite sans fibre; A4 : composite avec 10 % de sisal ; A6 avec 20 % ; A8 avec 40 % ; A avec 60 % et C avec 80 % [42]

Chand, N., & Dwivedi, U. (2008) [43] ont étudié les caractéristiques d'usure et de frottement des composites de polyester renforcés de fibres de sisal. Ils ont défini l'effet de l'agent d'accouplement au silane et de la charge appliquée sur le comportement tribologique du composite.

Les fibres de sisal possèdent des diamètres qui varient entre 200 et 400 μm et une longueur de 6 mm. Le peroxyde de méthyléthylcétone et le naphthénate de cobalt ont été ajoutés à la résine de polyester juste avant le mélange des fibres. La proportion de résine, d'initiateurs et de durcisseur, était de 100 :2 :2 en poids ainsi que les pourcentages en poids de fibres de sisal dans les composites étaient de 4, 10, 27, 30 et 42 %.

La machine, avec une surface glissante en acier de 6 330 m de distance, est utilisée pour effectuer le test d'usure sur les composites avec une la vitesse de glissement de 1,75 m/s, le diamètre des goupilles composites est 10 mm et la charge appliquée varie entre 10 et 100 N.

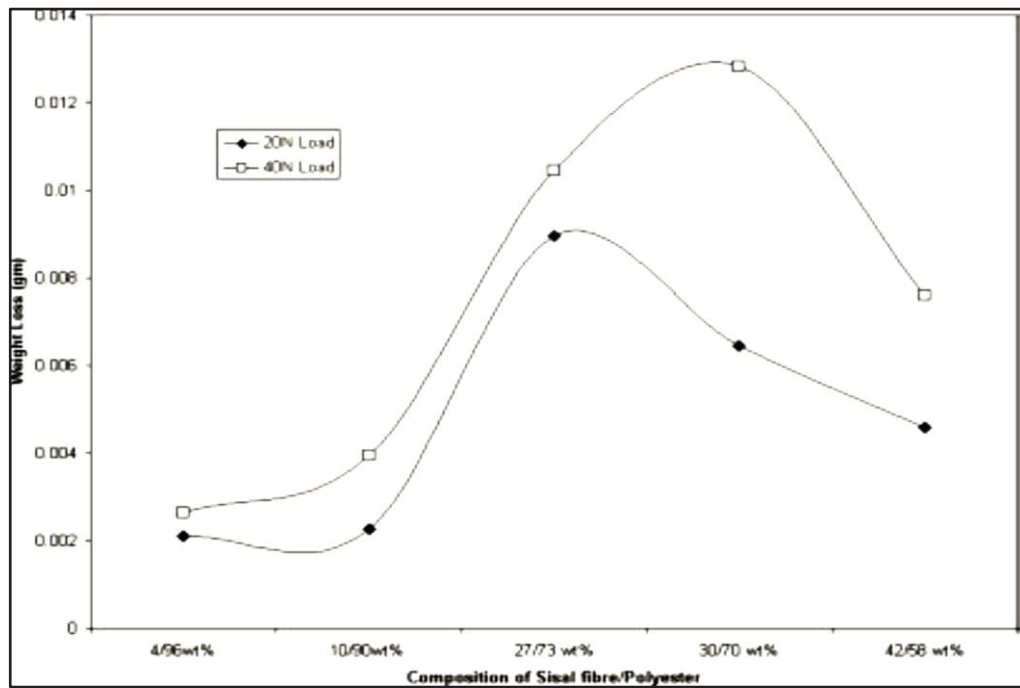


Figure II-24: Relation entre le taux des fibres et la perte de masse [43]

Les premiers résultats ont montré que la perte de poids dépend de la teneur de fibre en composite. En effet, la perte de poids augmente avec la teneur de fibre, mais à une teneur optimale (27 %), la perte de poids diminue (Figure II-24).

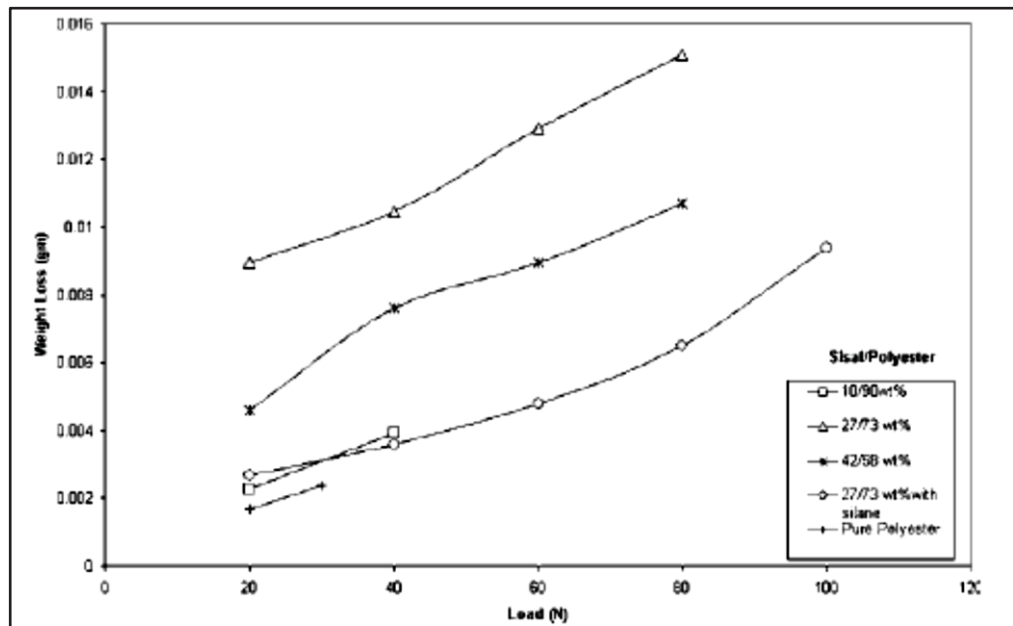


Figure II-25: Relation entre la charge et la perte de masse [43]

Le deuxième résultat montre la relation entre la perte de masse et la charge pour une vitesse de glissement constante. En effet, la perte de poids en polyester pur augmente avec la charge appliquée et se rompt à une charge de 30 N et à une vitesse de glissement de 1,75 m/s (Figure II-25).

Les composites de 27 % en fibre de sisal présentent une meilleure performance jusqu'à 80 N.

Esayed A.A. El-Sayed a, M.G. El-Sherbiny b, A.S. Abo-El-Ezz a, G.A. Aggag a [44] ont étudié le comportement à l'usure et frottement des composites unidirectionnels en fibre de lin et de jute avec une résine de polyester. Des essais ont été faits sur une machine à broche sur disque.

Les composites utilisés ont des pourcentages de 5, 12, 21 et 33 % pour la fibre de lin et de 13 et 15 % pour la fibre de jute. Des éprouvettes, de taille 3 mm x 5 mm x 15 mm, ont été fabriquées pour chaque fraction volumique de fibres et pour trois orientations de fibres.

Les essais sur les composites ont été réalisés en utilisant un disque de contre face de rugosité de surface de 0.15 μm . Après une période de rodage de 20 min, les résultats de coefficient de frottement ont été enregistrés pour les fractions volumiques correspondantes.

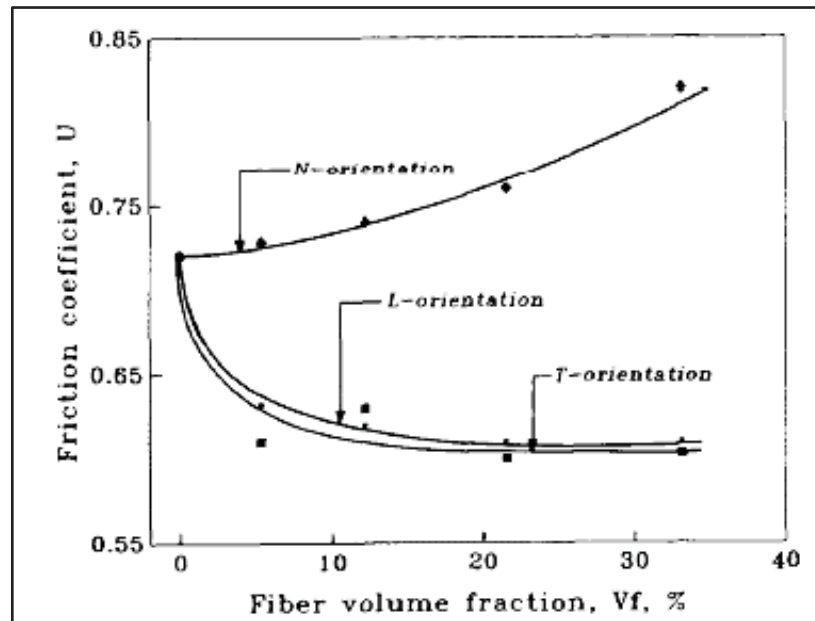


Figure II-26: Le coefficient de frottement en fonction du taux volumique de fibres [44]

La figure Figure II-26 présente l'effet de la fraction volumique de fibre sur le coefficient de frottement. D'ailleurs, pour les orientations longitudinales et transversales, le coefficient de frottement diminue lentement avec le pourcentage de fibre, ce qui n'est pas le cas pour l'orientation normale de fibre.

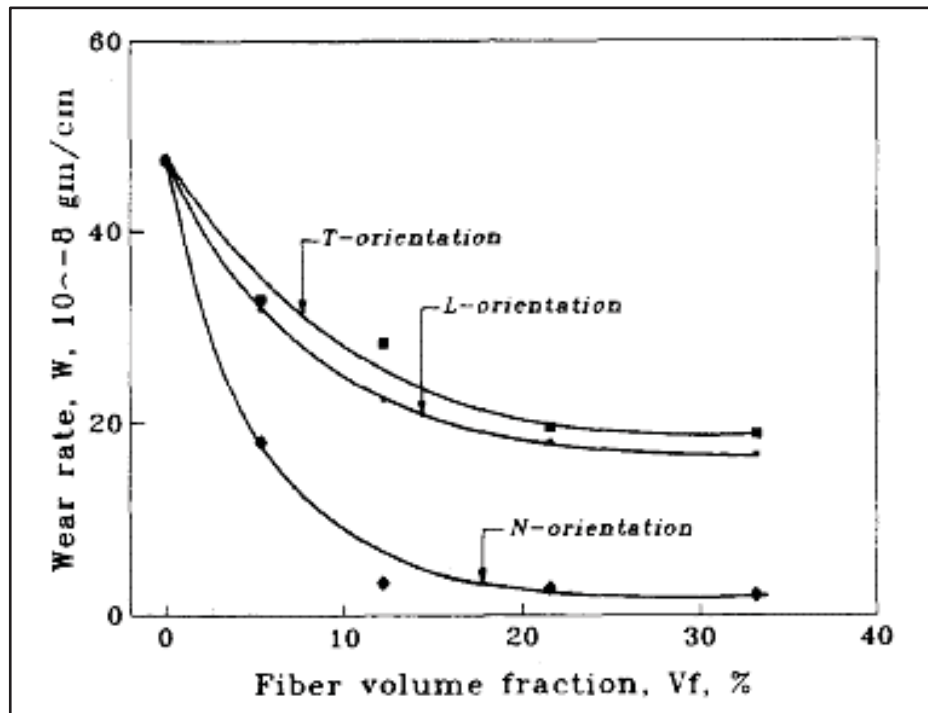


Figure II-27: Le taux d'usure en fonction du taux volumique de fibres [44]

La figure Figure II-27 présente l'effet de la fraction volumique des fibres sur le taux d'usure. En effet, le taux d'usure pour l'orientation normale diminue de 12.5 % avec l'augmentation de la fraction volumique ainsi qu'il diminue pour les deux autres orientations, mais moins sévèrement.

En conclusion, le comportement à l'usure diffère d'un matériau à l'autre. En effet, ce mode d'endommagement dépend de plusieurs paramètres comme la fraction volumique des fibres, la longueur des fibres, le couple, la vitesse et le nombre de cycles. Chaque travail effectué sur ces matériaux a ses propres spécifications. D'ailleurs, plusieurs bancs d'essais ont été mis en place pour déterminer le comportement à l'usure. Ce dernier peut être exprimé comme une perte de masse, une réduction de largeur ou une perte de volume. En général, le comportement à l'usure pour les matériaux composites à fibres naturelles présente de meilleures performances en comparaison avec les matériaux polymères sans renforts.

CHAPITRE III –MÉTHODOLOGIE

III.1 Matériaux

III.1.1 La matrice

Dans cette étude, la matrice utilisée est le polyéthylène à haute densité PEHD (Sclair ®2909), donné par Nova Chemicals. Sa densité est de 0.962 g/cm³.

III.1.2 Le renfort

Les renforts utilisés dans ce cas sont les fibres courtes industrielles (TMP, 35 mesh) de bouleau jaune préparées dans le centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques de Trois-Rivières (Canada). Elles ont une densité de 0.62 g/cm³. [45]

III.1.3 L'agent de couplage

L'agent de couplage utilisé est le MAPE (polyéthylène maléate, G2010), préparé par EASTMAN Chemical Company (Kingsport, TN, USA). Il a une densité de 0.92 g/cm³ et contient 1.5 % d'anhydride maléique. Dans notre étude, il est utilisé à 3 % en masse d'AC pour avoir un bon couplage entre la matrice et les fibres. [45]

III.2 Préparation des échantillons

La fabrication des engrenages se fait à l'aide du moulage par compression. Un broyeur à deux cylindres (Thermon CW Brabender, modèle T-303) a été utilisé pour mélanger le HDPE (20 % en masse) avec le MAPE (3 %) à une température de 170°. Les 80 % en masse du HDPE et les fibres de bouleaux sont ajoutés et mélangés pendant 7 min à 60 tr/min. Le composite est après mélangé pendant 15 min. À la fin, le composite est enlevé des rouleaux (Figure III-1). [46]

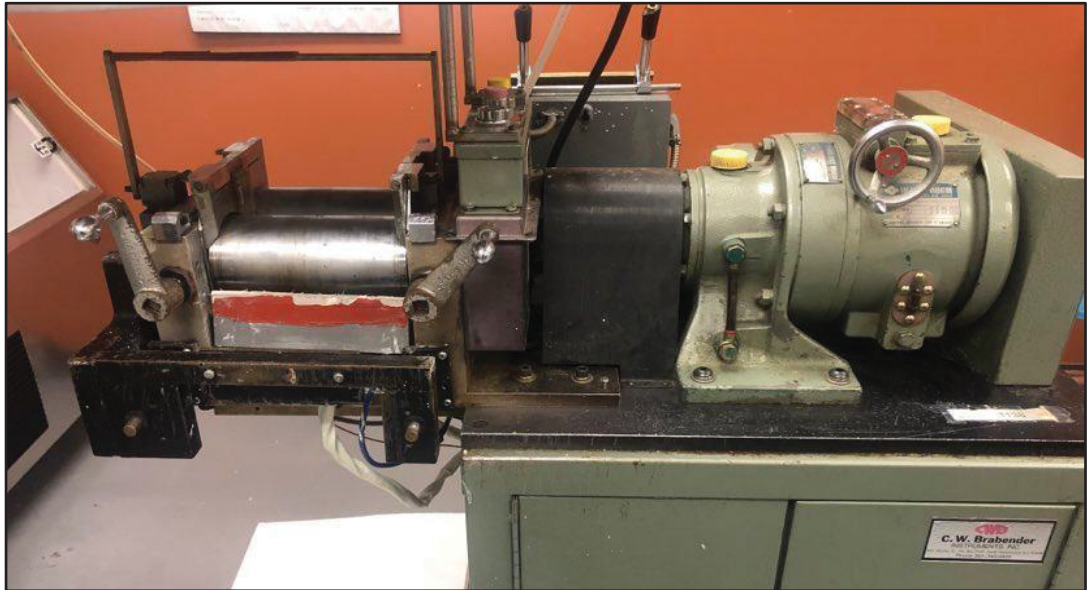


Figure III-1: Mélangeur à rouleau

D'abord, il fallait concevoir un moule correspondant aux dimensions des engrenages. Pour tenir compte de la rétraction plastique lors du refroidissement du moule, le diamètre du moule est de 82,2 mm tandis que celui de l'engrenage standard est de 81,28 mm, soit une rétraction de 1 % (Figure III-2). Le moule est rempli de granulés composites et placé dans une presse à 170 °C. [46]

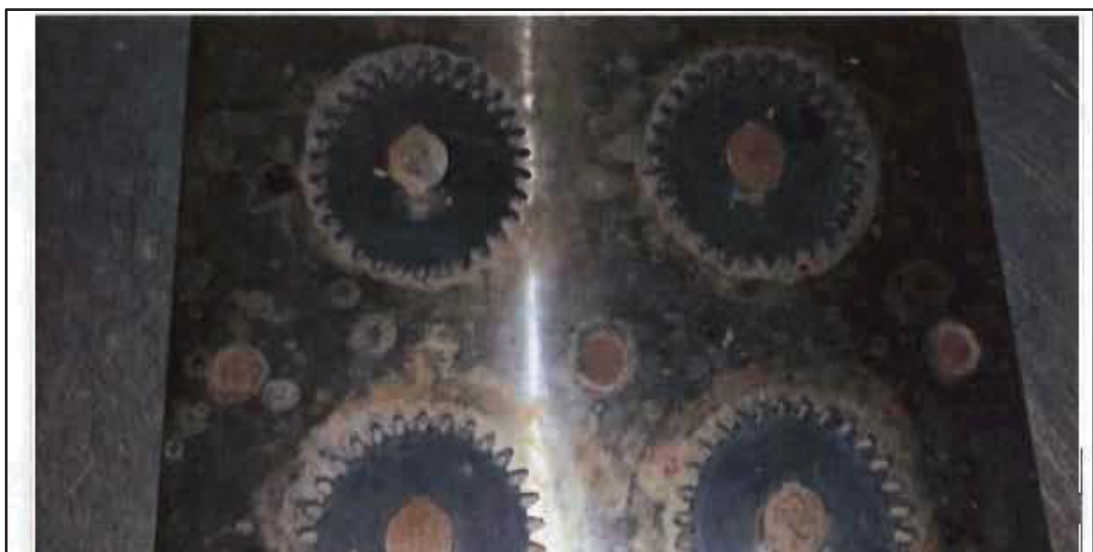


Figure III-2: Moule pour fabrication des engrenages

La pressurisation est réalisée en trois étapes : premier palier à 15 bars (5 min), deuxième palier à 25 bars (10 min) et le troisième palier à 30 bars (5 min) (Figure 0-3). [46]

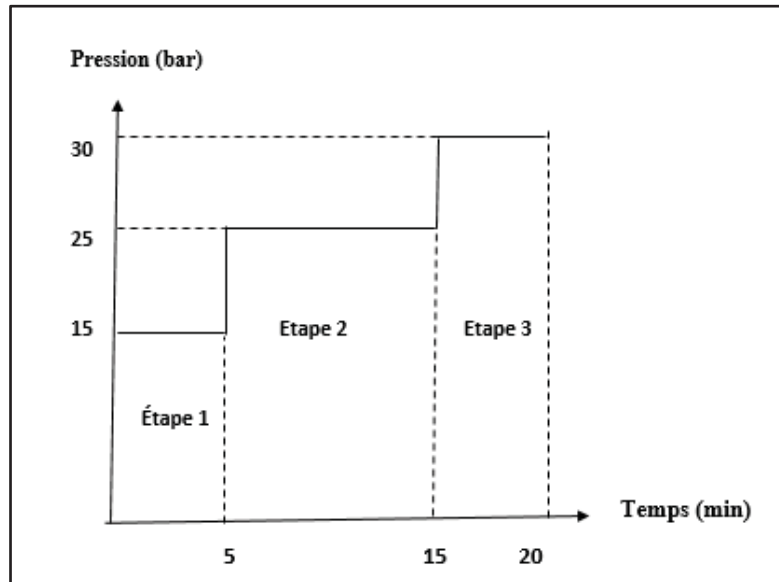


Figure 0-3: Les étapes de présurassions

Une fois que le composite a été formulé dans le mélangeur à rouleaux, la pâte est collectée et broyée en une pastille pour être utilisée dans la fabrication des engrenages.

Afin d'obtenir des résultats précis, les engrenages ont été sélectionnés de telle sorte qu'ils n'ont pas d'anomalies dans la fabrication.

Les engrenages sont ensuite mesurés et percés par une machine de perçage à commande numérique pour faire des trous afin d'effectuer un montage des engrenages sur le banc d'essai.

Le Tableau 0-1 présente les paramètres des engrenages obtenus après la préparation et la sélection.

Tableau 0-1 : Paramètres des engrenages préparés

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

III.3 Étude expérimentale

III.3.1 Dispositifs et principe de fonctionnement

Deux roues dentées tournent l'une contre l'autre sur le banc d'essai. Un couple peut être appliqué à l'un des deux pignons depuis un ordinateur connecté à la machine. Au début, la machine est démarrée sans charge, ce qui laisse le temps de régler correctement la vitesse de rotation. Un compteur de vitesse stroboscopique est utilisé pour vérifier la vitesse. Le couple est ensuite appliqué progressivement afin de ne pas endommager les échantillons en phase de test.



Figure 0-4: Banc d'essai à engrenage

Le banc d'essai est une machine de simulation réelle d'une charge appliquée sur un système d'engrenage. Le moteur électrique (Louis Allis®, Type PJMX, 575 Volt, 3 CV), couplé à un variateur de vitesse (Cleveland © Série 66A, taille 6K42M), assure la rotation d'un premier arbre dans lequel sont fixés un engrenage en acier et un vérin. Le vérin rotatif exerce un couple sur l'arbre alors que l'engrenage fait tourner un deuxième arbre. Ce vérin est piloté par un régulateur pneumatique à commande électrique. Le couple-mètre est installé sur le deuxième arbre pour mesurer le couple exercé. Il le convertit en signal électrique avant de le transmettre à une carte d'instrumentation analogique (USB NI myDAQ). À l'extrémité des deux arbres, des supports sont utilisés pour fixer les engrenages (Figure 0-4).

III.3.2 Plan d'expérience

Des engrenages en teneur de fibres 0, 10, 20, 30 et 40 % ont été produits pour élargir le champ de combinaisons possibles. Les couples à appliquer, qui ont été choisis, sont les quatre valeurs (2 Nm, 4 Nm, 5 Nm et 6 Nm) et ils fonctionnent à trois vitesses de rotation (500 tr/min, 1 000 tr/min et 1 500 tr/min) (Figure 0-5). La durée de chaque test est de quatre heures. La température est ambiante dans la pièce où les essais sont réalisés et elle est comprise entre 20 et 24 °C. [45]

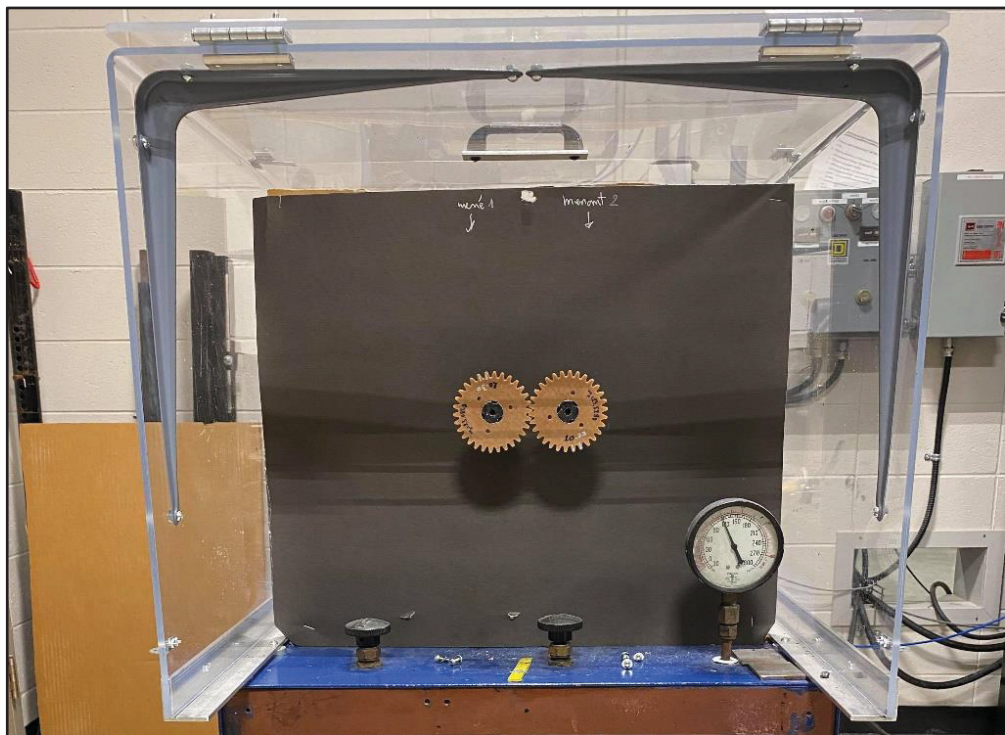


Figure 0-5: Banc d'essai sur engrenages

On distingue trois facteurs de contrôle : Taux massique de fibre dans le composite, le couple et la vitesse de rotation. Chacun de ces variables a des niveaux différents. (

Tableau 0-2)

Tableau 0-2: Facteur de contrôle et niveau

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

La section suivante traite des différentes étapes de mesure de l'usure sur les échantillons après avoir effectué les tests sur le banc d'essai avec les différents paramètres. Elle présente également les résultats de mesure de l'usure pour les échantillons étudiés et montre l'effet des paramètres de fonctionnements sur ce mode d'endommagement.

CHAPITRE IV –ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

IV.1 Mesure de l'usure

IV.1.1 Métrologie

Les engrenages sont mesurés afin de déterminer l'usure au niveau des dents, ceci est effectué au laboratoire de génie mécanique. Cette étude métrologique permettra de définir le comportement de l'usure sur le flanc de la dent en utilisant la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

IV.1.2 Machine de mesure

L'UQTR dispose d'un palpeur MMT. Cette machine permet d'effectuer des mesures par contact au moyen d'un bras principal qui possède une ou plusieurs sondes à son extrémité (palpeurs à bille) (Figure IV-1). Le micromètre (μm) est la précision des mesures.

Les palpeurs permettent un déplacement en translation tridimensionnel :

- Le support du bras se déplace sur le bâti selon la largeur de la machine (A).
- Le bâti se déplace sur le marbre, selon la profondeur de la machine (B).
- Le bras se déplace dans son support verticalement (C).[47]

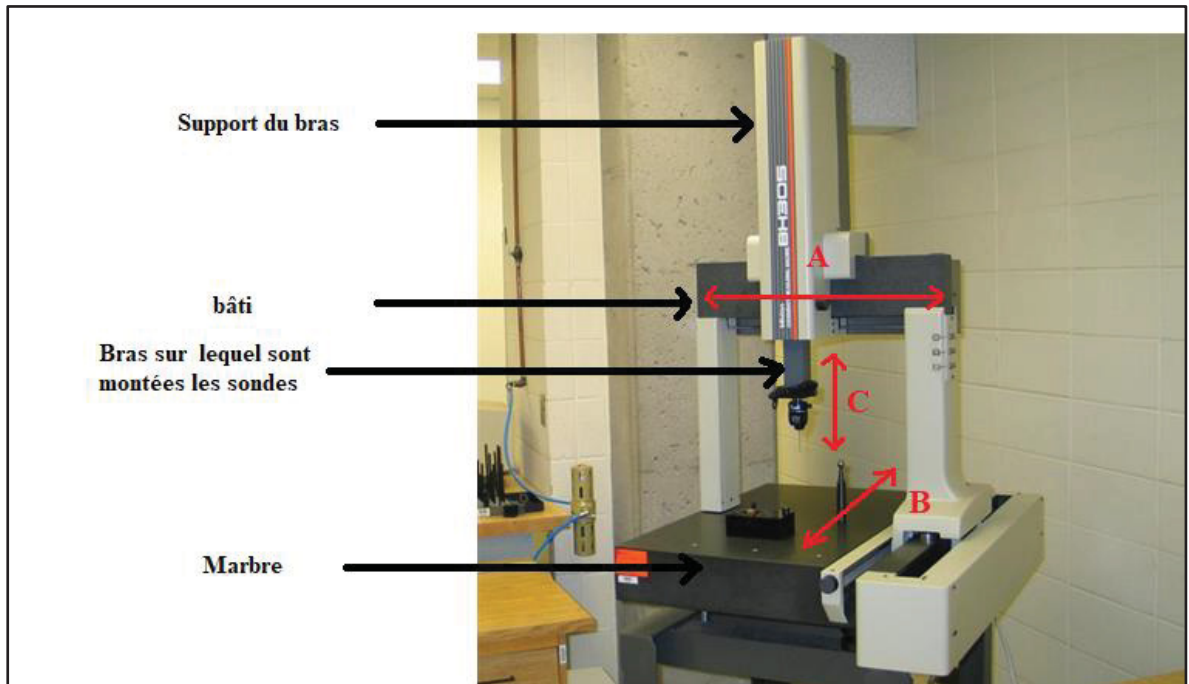


Figure IV-1: Machine à mesurer tridimensionnelle

IV.1.3 Principe de mesure

IV.1.3.1 Définition du repère

Afin d'effectuer des mesures précises sur le pignon et la roue dentée, un repère de travail doit être établi. Le repère est défini de telle sorte que la face avant du pignon est le plan de référence, et l'axe Z est la normale à ce plan de référence.

L'origine du repère est le centre de l'alésage au niveau du plan de référence, ainsi que les deux autres directions, qui correspondent à X et Y, forment un trièdre direct (Figure IV-2).

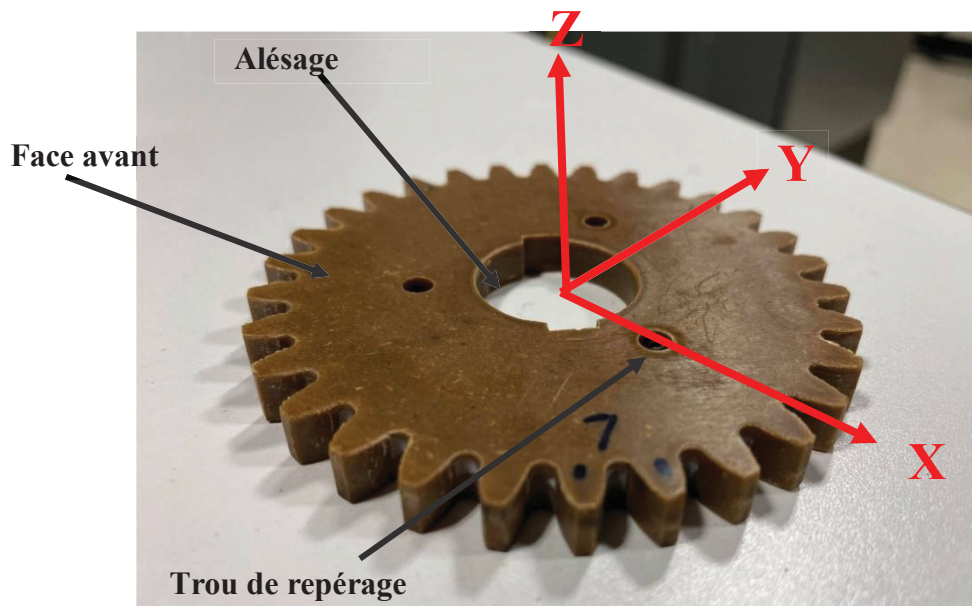


Figure IV-2: Repère de travail

IV.1.3.2 Dent à mesurer

Dans cette étude, il est question de mesurer trois dents du pignon placées suivant les trois trous sur l'engrenage (Figure IV-3).

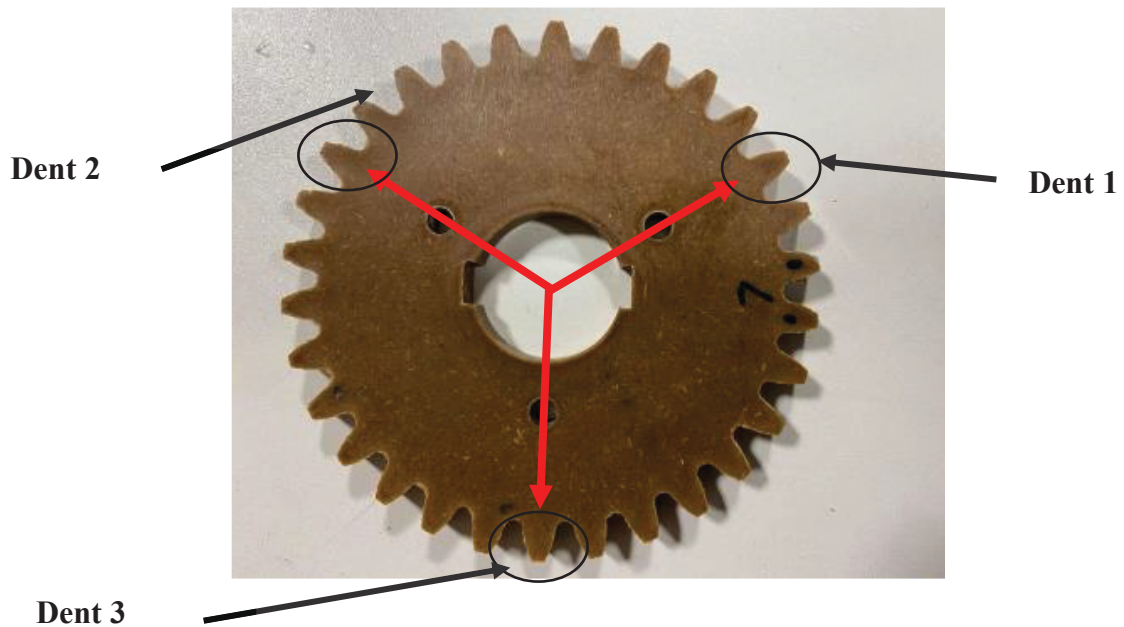


Figure IV-3: Dents à mesurer

IV.1.3.3 Distribution des points à mesurer

Les mesures, qui doivent être faites sur les dents d'engrenages, doivent être bien définies avant de commencer. Le profil de la dent est maillé de telle sorte que le palpeur aura un contact avec un maximum de point sur profil de la dent (Figure IV-4).

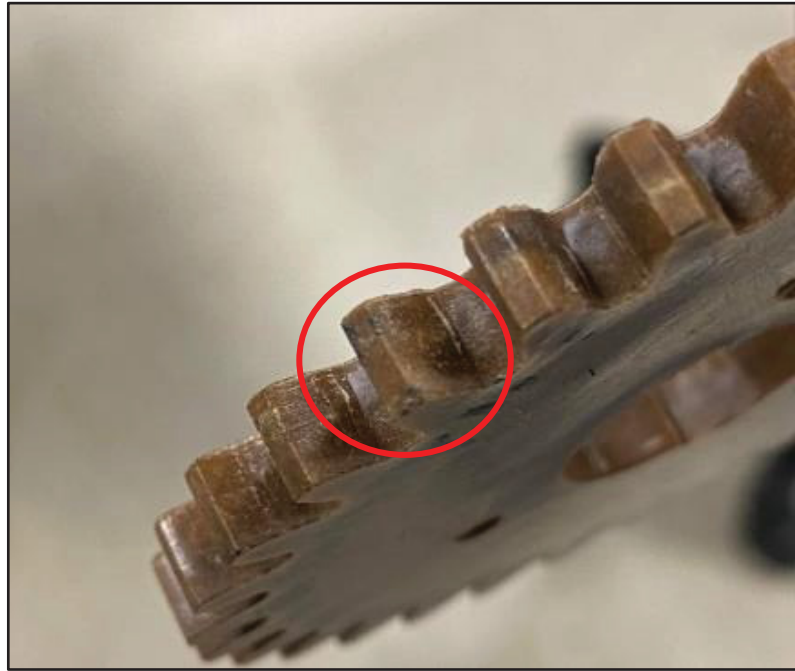


Figure IV-4: Profil de la dent

La distribution des points sur le profil de la dent est montrée dans la Figure IV-5. En effet, sur le flanc de la dent on trouve cinq points répartis sur une ligne de cette surface. La ligne se trouve à mi-épaisseur de la dent.

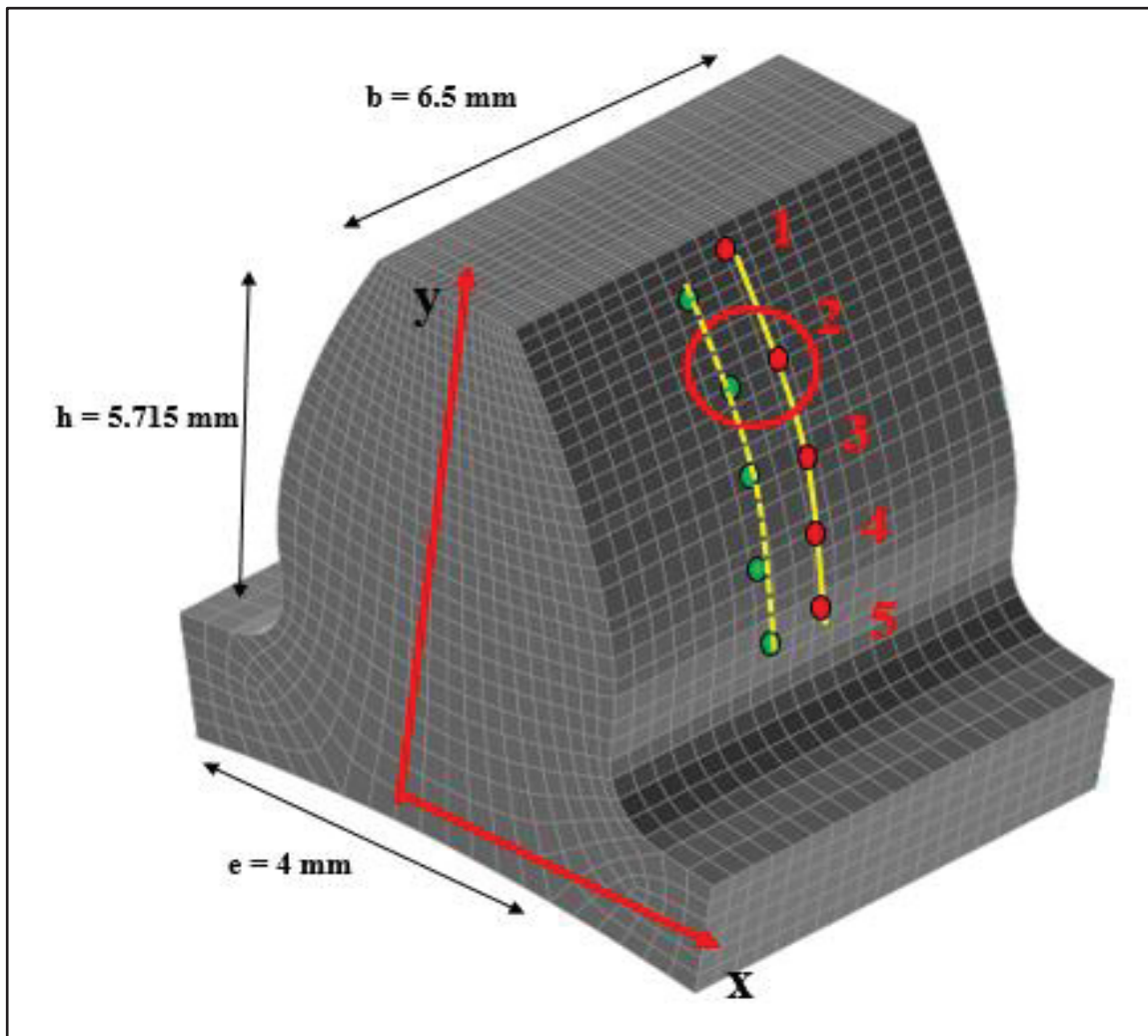


Figure IV-5: Distribution des points à mesurer

[48]

La distribution des points (Figure IV-6) est telle que :

- Le point 1 : au sommet de la dent
- Le point 2 : entre le point 1 et le cercle primitif
- Le point 3 : par le cercle primitif
- Le point 4 : point en bas du cercle primitif
- Le point 5 : au pied de la dent

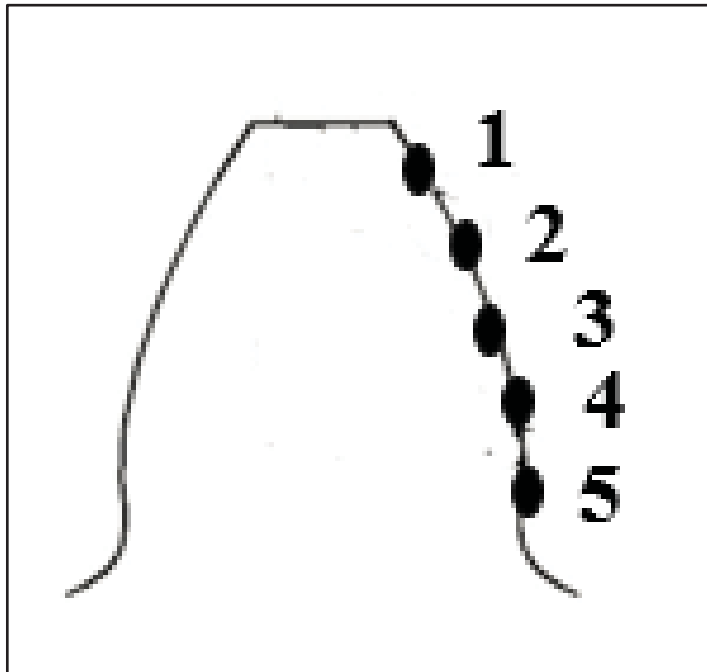


Figure IV-6: Les points à mesurer

- Hauteur de la dent :

$$d = h_a + h_f = 2.25 \times m = 5.715 \text{ mm} \quad (\text{II.5})$$

- Diamètre primitif :

$$d = m \times Z = 2.54 \times 30 = 76.2 \text{ mm} \quad (\text{II.6})$$

- Rayon primitif :

$$r_{\text{primitif}} = \frac{d}{2} = 38.1 \text{ mm} \quad (\text{II.7})$$

- Diamètre de base :

$$d_b = d \times \cos \alpha = 71.60 \quad (\text{II.8})$$

- Rayon de base :

$$r_{\text{base}} = \frac{d_b}{2} = 35.8 \text{ mm} \quad (\text{II.9})$$

- **Diamètre du pied :**

$$d_f = d - 2.5 \times m = 69.85 \text{ mm} \quad (\text{II.10})$$

- **Rayon du pied :**

$$r_{\text{pied}} = \frac{d_b}{2} = 34.925 \text{ mm} \quad (\text{II.11})$$

- **Diamètre de tête :**

$$d_{\text{tête}} = d + 2 \times m = 81.28 \text{ mm} \quad (\text{II.12})$$

- **Rayon de tête :**

$$r_{\text{tete}} = \frac{d_{\text{tête}}}{2} = 40.64 \text{ mm} \quad (\text{II.12})$$

Le Tableau IV-1 montre la position des cinq points sur le flanc de la dent d'engrenage pour déterminer le comportement à l'usure dans chaque point.

Tableau IV-1: Position des points sur le flanc de la dent

Point	Rayon de courbure (mm)	Rayon du point / rayon primitif (mm)	Position	Rayon de base (mm)
1	40.1	1.052	Saillie	35.8
2	39.1	1.026	Saillie	
3	38.1	1	Primitif	
4	37.1	0.973	Creux	
5	36.1	0.947	Creux	

Après avoir précisé le marquage des points, le palpeur est mis en contact avec ces points sur la ligne définie auparavant.

- Le palpeur est mis en position en face du premier point à mesurer (cercle de tête).
- On déplace le palpeur suivant les directions définies.
- Les coordonnées du point sont déterminées au contact.[47]

IV.1.3.4 Déplacement à mesurer

Les résultats de l'usure seront donnés en forme de déplacements de chaque point à un autre. Ces déplacements sont mesurés par rapport à la ligne étant donné que le flanc de la dent n'est pas droit (Figure IV-7).

$$\Delta_D = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} \quad (\text{II.13})$$

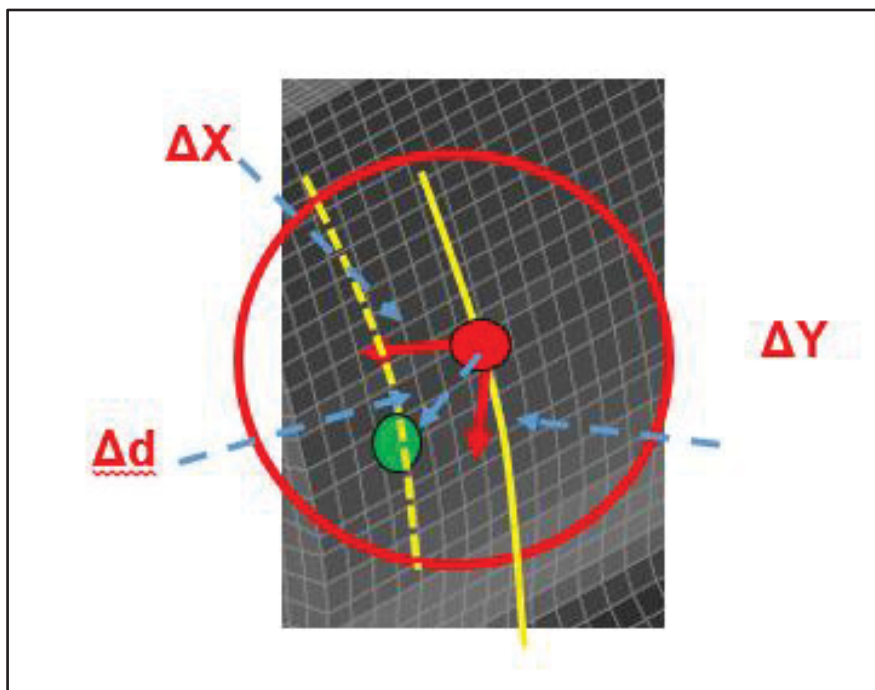


Figure IV-7: Le déplacement à mesurer

Les résultats de mesures obtenus permettent de donner une idée sur le comportement de l'usure en fonction de plusieurs paramètres et c'est ce que nous détaillerons dans la prochaine section.

IV.2 Évaluation de l'usure en tout point du profil actif

Dans cette partie, on va interpréter les différents résultats obtenus à partir des mesures de l'usure sur les différents échantillons de taux de fibres de 0 %, 20 %, 30 % et 40 % ainsi que l'effet des paramètres de fonctionnement sur le comportement à l'usure.

IV.2.1 Interprétation des résultats

Seront présentés dans les tableaux de cette section, les résultats des différentes mesures qui sont effectuées sur les engrenages. Au total, 1 800 points ont été palpés pour les roues menées et menantes.

L'usure présentée est un déplacement des points en micromètre (μm) et elle est en fonction des cinq positions sur la dent d'engrenage.

Le Tableau IV-2 montre les résultats des coordonnées (x,y) avant essai du point 1 palpé sur les 3 dents pour les roues menées et menantes pour un couple de 2 N.m et avec une vitesse de rotation de 500 tr/min.

Le z, étant fixe pour tous les échantillons, définit la profondeur en demi-largeur de la dent où les cinq points ont été palpés.

Tableau IV-2: Coordonnées du point 1 pour les 3 dents

Vitesse de rotation 500 tr/min ;		
Z= 3,25		
Couple	Mené	menant
2 N.m	E29.00	E30.00

Coordonnées avant mené						Coordonnées avant menant					
Dent 1		Dent 2		Dent 3		Dent 1		Dent 2		Dent 3	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
-12.6117237	148.071604	-49.6924613	95.0796959	13.5401978	88.7972567	-15.0142364	148.102296	-48.2903435	93.8075433	15.5432441	90.4519145

Le Tableau IV-3 donne des résultats du point 1 des deux roues pour les trois dents d’engrenages après essai.

Tableau IV-3: Coordonnées du point 1 après essai

Coordonnées après mené						Coordonnées après menant					
Dent 1		Dent 2		Dent 3		Dent 1		Dent 2		Dent 3	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
-12.6863547	148.068388	-49.62426	95.0785604	13.4715233	88.8012739	-15.0812638	148.105681	-48.2385686	93.8033834	15.5952909	90.4531824

Le Tableau IV-4 montre la différence des coordonnées (x,y) du point 1 avant et après essai pour les trois dents d’engrenages.

Tableau IV-4: Différence de coordonnées du point 1

Différence en % mené						Différence en % menant					
Dent 1		Dent 2		Dent 3		Dent 1		Dent 2		Dent 3	
DX	DY	DX	DY	DX	DY	DX	DY	DX	DY	DX	DY
-0.07463101	-0.00321593	0.06820126	-0.0011355	-0.06867458	0.00401718	-0.06702743	0.0033854	0.05177494	-0.00415995	0.05204681	0.00126787

Le Tableau IV-5 montre le déplacement calculé par : $\Delta_D = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$ (II.13)

Tableau IV-5: Déplacement des points (en mm) pour les 3 dents

deplacement mené			deplacement menante		
Dent 1	Dent 2	Dent 3	Dent 1	Dent 2	Dent 3
DD	DD	DD	DD	DD	DD
0.074700264	0.068210716	0.06879197	0.067112872	0.05194179	0.052062247

Le Tableau IV-6 regroupe les déplacements, en moyenne des 3 dents, trouvés dans le Tableau IV-5.

Tableau IV-6: Déplacement moyen (en mm) des 3 dents

moyenne dep mené	moyenne dep menante
0.0706	0.057

Le premier tableau (Tableau III-7) montre les résultats de l'usure pour un couple de 2 N.m des échantillons Eij avec les pourcentages de fibres et elle est comprise entre 14 μm et 193 μm .

Tableau III-7: Résultats d'usure pour un couple de 2 N.m

Couple (N.m)	Pourcentage (Wt. %)		Position	500 tr/min		1000 tr/min		1500 tr/min	
				Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)	Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)	Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)
2	E29.00	E30.00	1	70.651118	57.0099102	93.8340558	69.6525576	154.42191	80.216077
			2	78.7457071	58.6245142	99.9570921	72.4901844	160.559127	83.915712
			3	82.5312371	62.841703	99.879086	72.0135509	165.650877	83.613237
			4	59.9598834	53.9101501	86.4725803	78.0074692	103.111272	81.280541
			5	45.1593957	43.7505496	58.5077003	57.8702206	100.820219	75.498176
	E01.10	E02.10	1	58.7704363	57.9337468	90.9463598	68.9420583	172.135289	149.470203
			2	66.6142721	27.2947869	91.0956798	79.8631134	175.180361	134.538323
			3	60.7529113	36.9854712	91.4332637	81.9302499	192.831652	160.74365
			4	31.5107844	49.2727152	57.9172305	72.525218	172.339073	179.420248
			5	42.9580412	31.9345622	29.3886997	64.5804514	172.83022	172.619111
	E01.20	E02.20	1	43.9541947	38.2908426	13.9541947	38.2908426	131.28681	156.93433
			2	49.2677459	54.7074934	49.2677459	54.7074934	135.665811	144.982581
			3	63.6651934	58.7392454	63.6651934	58.7392454	167.167302	125.296172
			4	58.409678	54.4267464	58.409678	54.4267464	133.848551	134.328288
			5	47.2131707	65.5015335	37.2134674	65.5015335	105.726603	133.729978
	E11.30	E10.30	1	37.8871468	24.1511542	40.272653	23.918194	60.647042	59.07242
			2	38.38838	37.8068097	43.191075	26.465714	62.6134448	64.709128
			3	35.8520237	33.8184885	52.773899	36.275256	66.864656	57.30476
			4	16.3708857	38.6303207	38.794749	23.94182	53.042615	55.768033
			5	16.8047801	12.8995637	32.827542	15.923787	55.9839326	38.76383
E01.40	E02.40	1	25.4812528	19.9448181	31.316359	90.2065667	76.612234	59.5861715	
		2	31.0410222	33.8744117	33.687387	32.424708	86.1652131	65.93759	
		3	14.8971811	39.6131683	46.9987	34.888433	77.0387527	66.8824775	
		4	14.809259	18.5487384	28.500711	30.9881557	88.059894	47.1660787	
		5	14.1831832	17.0740862	20.580437	29.953475	91.0350296	46.2721686	

Le deuxième **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) donne les résultats pour un couple de 4 N.m. Ces derniers présentent une usure plus élevée comparée au couple de 2 N.m et elle est comprise entre 24 μm et 199 μm

Erreur ! Source du renvoi introuvable. Tableau III-8: Résultats d'usure pour un couple de 4 N.m

Erreur ! Source du renvoi introuvable.Le troisième

Tableau III-9) montre les résultats de l'usure pour un couple de 5 N.m et elle est comprise entre 101 μm et 387 μm .

Tableau III-9: Résultats d'usure pour un couple de 5 N.m

Couple (N.m)	Pourcentage (Wt. %)		Position	500 tr/min		1000 tr/min		1500 tr/min	
				Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)	Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)	Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)
5	E05.00	E06.00	1	250.685934	196.331362	320.409725	217.838103	386.93775	255.73296
			2	259.262298	195.565072	323.935094	226.064423	387.846027	252.211719
			3	260.095676	205.843827	350.220266	228.496033	369.528141	259.333682
			4	264.242475	131.53542	305.754039	219.297715	372.975731	236.444402
			5	246.496329	136.296091	294.443258	206.661205	384.298992	231.909019
	E05.10	E06.10	1	246.472911	198.337791	243.673689	199.556606	267.363608	221.946875
			2	215.446127	183.976195	253.263033	190.079059	268.532652	225.248558
			3	238.835487	187.880185	255.409315	190.94456	274.017436	230.529296
			4	232.890939	175.714709	240.986013	201.342124	257.177703	228.161199
			5	207.229846	164.157992	216.620733	164.702731	234.854201	224.689877
	E05.20	E06.20	1	192.076085	126.27704	222.076085	136.27704	250.129098	187.140716
			2	191.022241	119.590611	221.022241	139.590611	254.100124	192.6338
			3	195.976505	127.96717	225.976505	147.96717	252.175386	179.587954
			4	169.961887	107.975782	219.961887	127.975782	230.369012	180.25777

	E05.30	E06.30	5	162.166035	109.55001	205.166035	119.55001	224.212317	176.609625
			1	172.446418	122.875678	186.508223	157.116411	191.787673	162.525461
			2	172.675017	114.537145	188.957686	157.421561	193.102767	165.948834
			3	173.014439	115.088705	195.810229	149.170336	203.350524	164.933082
			4	163.591642	114.360163	173.560057	125.132554	184.133497	161.473285
	5	165.379713	101.515174	169.17988	119.853702	180.27105	155.582867		
	E05.40	E06.40	1	167.607224	121.329351	174.204205	95.1339255	187.492652	121.239224
			2	164.226616	119.412726	174.999784	103.336079	192.978759	124.240901
			3	167.679769	114.133566	175.851987	102.295666	199.330091	121.966162
			4	158.917889	105.350989	162.291933	102.956817	182.410364	118.223761
			5	150.937693	105.357305	159.509772	107.993949	183.713148	118.128145

Le quatrième Tableau III-10) donne les résultats pour un couple de 6 N.m qui présentent une usure importante en comparaison avec les autres couples et elle comprise entre 95 μm et 687 μm .

Tableau III-10: Résultats d'usure pour un couple de 6 N.m

Couple (N.m)	Pourcentage (Wt. %)		Position	500 tr/min		1000 tr/min		1500 tr/min	
				Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)	Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)	Roue Menée (μm)	Roue menante (μm)
6	E07.00	E08.00	1	361.742823	194.528784	484.104353	213.98983	640.769242	568.096182
			2	365.111631	192.305263	495.62861	209.72373	665.624119	573.69703
			3	372.353702	193.533122	490.201981	224.09768	687.752997	538.451993
			4	360.574343	181.837604	482.496108	201.43098	592.651313	530.2972
			5	359.021597	183.867745	477.70163	192.574156	478.514817	525.147653
	E07.10	E08.10	1	326.383979	190.640833	406.223707	201.877485	609.080879	475.743589
			2	333.455838	193.053182	413.467169	209.823145	686.623581	463.284793
			3	330.308974	187.130774	416.559255	212.744133	596.547186	477.296052
			4	310.554044	182.439429	398.084141	210.07263	597.502328	481.075718
			5	303.322898	175.401383	387.920757	207.36679	519.389535	395.755481
	E07.20	E08.20	1	231.376135	139.572684	337.494083	184.116435	335.878258	262.836413
			2	230.441673	140.966466	343.499871	184.551786	351.63959	254.146015
			3	281.889265	140.54587	347.025197	184.184804	365.95077	253.177717
			4	275.561867	141.654747	329.54464	177.480957	367.745698	256.474186

	E07.30	E08.30	5	193.740238	126.767296	312.615737	164.442	331.078355	253.569886
			1	191.293893	136.848377	271.293893	170.848377	290.229921	237.258587
			2	195.342056	132.483645	285.342056	182.483645	294.258757	232.513431
			3	195.174492	138.910239	285.174492	188.910239	294.417625	238.087323
			4	197.175571	124.188963	267.175571	173.188963	285.889644	221.256159
	5	178.030093	113.267497	268.030093	173.267497	277.234173	220.314075		
	E07.40	E08.40	1	191.101326	128.479807	254.319071	109.984635	80.648721	186.0917
			2	187.066996	127.197767	255.196111	112.196914	71.2810647	191.957217
			3	189.802272	129.039478	250.01726	116.775133	77.5778502	194.198064
			4	183.037783	129.534123	221.529586	107.305638	87.7572577	184.189714
5			164.334628	123.879307	193.703543	95.5047436	90.0164979	182.520648	

Le Tableau III-11 présente les résultats de l'usure des cinq positions en moyenne d'après les tableaux précédents en fonction des quatre couples ainsi que les différents taux de fibres.

Tableau III-11: Résultats d'usure pour différents couples en fonction du taux de fibres

Couple (N.m)	Pourcentage (Wt. %)	500 tr/min		1000 tr/min		1500 tr/min	
		Roue menante (µm)	Roue Menée (µm)	Roue menante (µm)	Roue Menée (µm)	Roue Menée (µm)	Roue menante (µm)
2	0%	67.4094683	55.2273654	87.7301029	70.0067965	136.912681	80.9047486
	10%	52.1212891	40.6842565	72.1562467	73.5682182	177.063319	159.358307
	20%	52.5019965	54.3331723	44.5020559	54.3331723	134.739015	139.05427
	30%	29.0606433	29.4612674	41.5719836	25.3049542	59.8303381	55.1236342
	40%	20.0823797	25.8110445	32.2167188	43.6922677	83.7822247	57.1688973
4	0%	144.786508	124.481175	170.758802	98.6211894	194.591118	117.14613
	10%	104.248818	154.323784	150.858478	135.749182	71.0359315	96.6763587
	20%	115.134469	102.657387	118.298669	88.7540534	128.645729	85.2085687
	30%	63.072863	33.40277	85.9566844	81.6442679	101.596815	89.7871196
	40%	58.5779981	34.7606518	83.0916299	53.3982324	89.1586611	68.0044672

5	0%	256.156542	173.114354	318.952476	219.671496	380.317328	247.126356
	10%	228.175062	182.013374	241.990556	189.325016	260.38912	226.115161
	20%	182.240551	118.272123	218.840551	134.272123	242.197187	183.245973
	30%	169.421446	113.675373	182.803215	141.738913	190.529102	162.092706
	40%	161.873838	113.116787	169.371536	102.343287	189.185003	120.759639
6	0%	363.760819	189.214504	486.026536	208.363275	613.062498	547.138012
	10%	320.805147	185.73312	404.451006	208.376837	601.828702	458.631127
	20%	242.601836	137.901413	334.035906	178.955196	350.458534	256.040843
	30%	191.403221	129.139744	275.403221	177.739744	288.406024	229.885915
	40%	183.068601	127.626096	234.953114	108.353413	81.4562783	187.791469

IV.2.2 Effet de la teneur en fibres naturelles

Les tests tribologiques sur les engrenages, avec les cinq pourcentages en fibres, ont été effectués pour déterminer le pourcentage optimal en taux de fibres de bouleau tout en augmentant le couple de 2N.m à 6 N.m. la Figure IV-8 montre l'effet du taux de fibres sur le comportement en usure en termes de réduction de l'épaisseur de la dent.

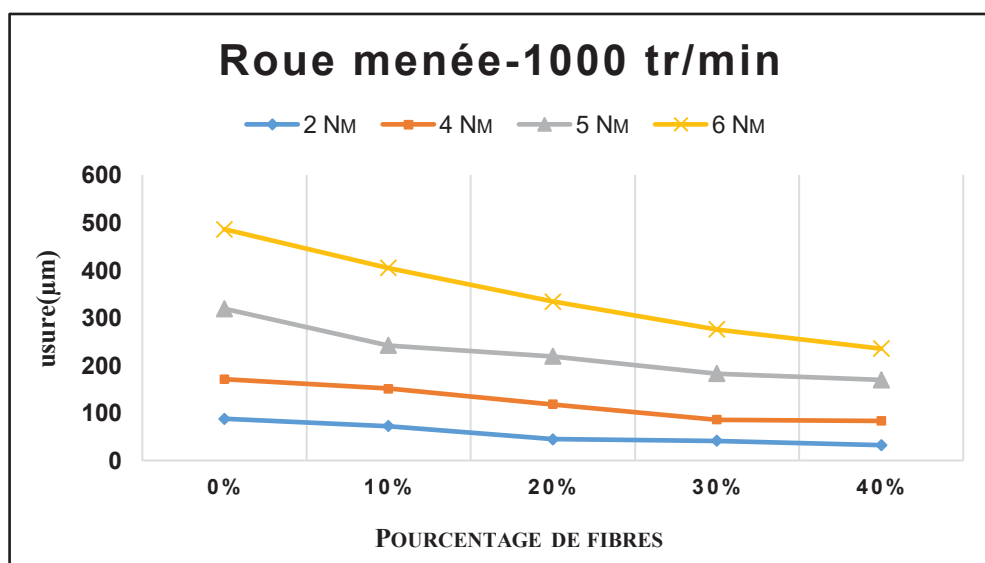


Figure IV-8: Usure (μm) en fonction du pourcentage de fibres pour la roue menée à 1 000 tr/min

En fixant la vitesse à 1 000 tr/min et pour la roue menée, l'usure diminue significativement avec l'augmentation du pourcentage de fibres de bouleaux des différents échantillons. Elle diminue en moyenne de 53 % pour les différents couples étudiés.

Cependant, les fibres de bouleau ont permis aux engrenages de réduire considérablement l'écart du profil de la dent en raison de l'amélioration de la résistance. Il est constaté que pour un couple de 6 Nm, l'usure diminue sévèrement avec le pourcentage de fibres en comparaison avec un couple de 2 Nm.

La Figure IV-9 montre l'effet du pourcentage de fibres sur l'usure de la roue menante pour une vitesse de 1 000 tr/min.

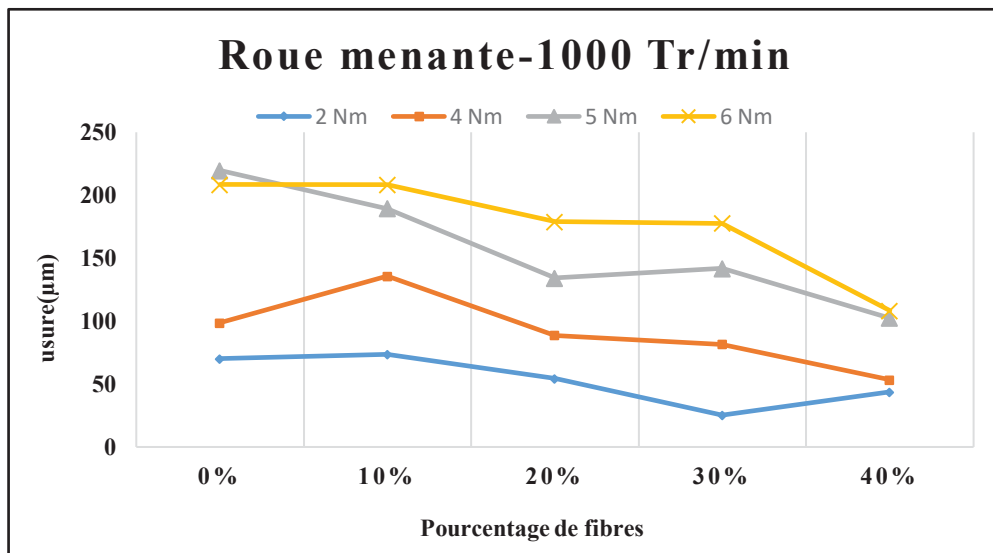


Figure IV-9: Usure (μm) en fonction du pourcentage de fibres pour la roue menante à 1000 tr/min

On constate que comme pour la roue menée, l'usure diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans le composite pour la roue menante, mais de 46 %. Cela démontre une bonne compatibilité fibre-matrice.

Il est constaté qu'au même pourcentage de fibres et à la même vitesse de rotation, l'usure dans la roue menante est moins sévère par rapport à la roue menée.

La Figure III-10 montre l'effet du pourcentage de fibres de bouleau pour une vitesse de 500 tr/min pour la roue menée.

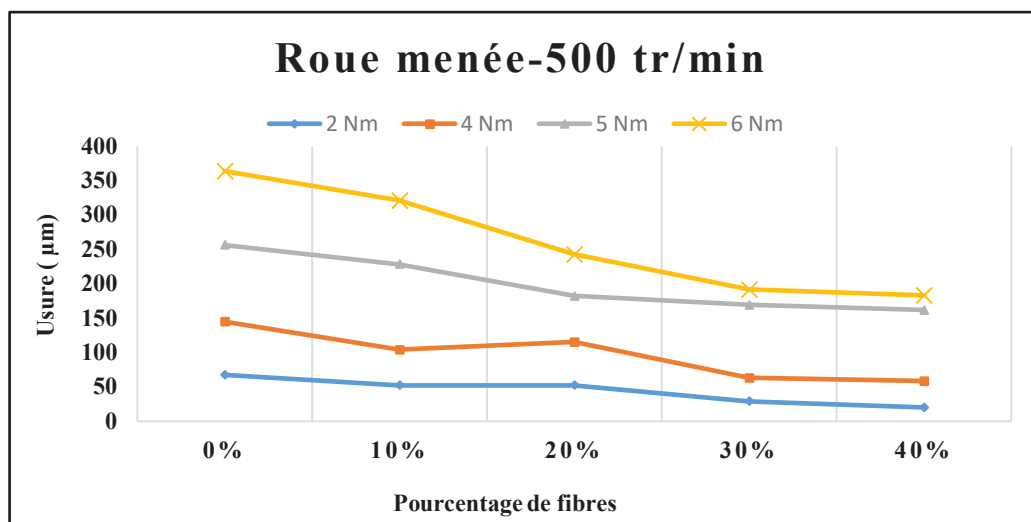


Figure III-10: Usure (µm) en fonction du pourcentage de fibres pour la roue menée à 500 tr/min

On constate que l'usure diminue d'une moyenne de 54 % avec l'augmentation du taux de fibres, ce qui confirme les résultats obtenus pour une vitesse de 1 000 tr/min.

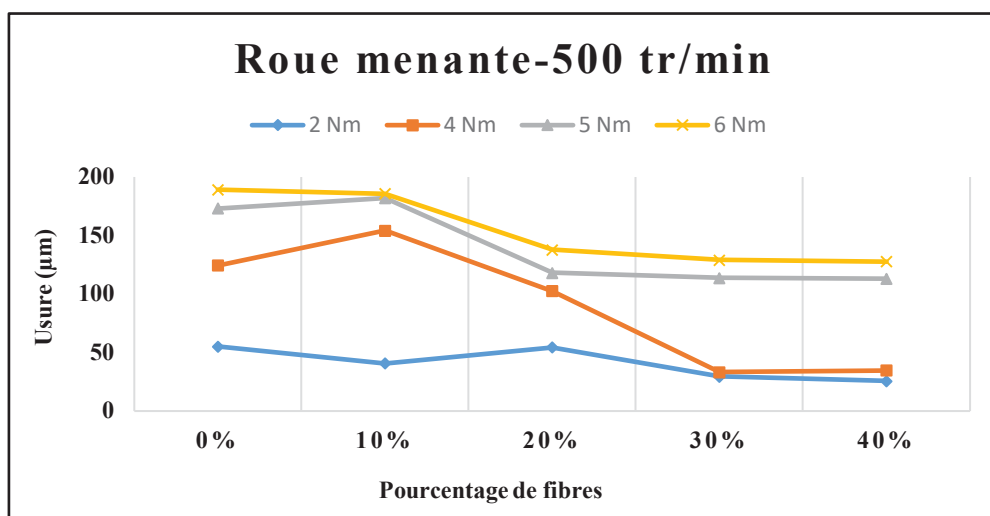


Figure IV-11: Usure (μm) en fonction du pourcentage de fibres pour la roue menante à 500 tr/min

La Figure IV-11 montre les mêmes constatations pour une vitesse de 1 000 tr/min. En effet, l'usure diminue en moyenne de 48 % et ce comportement généralement revient à la surface riche en fibres qui joue un rôle de lubrifiant pour diminuer le taux d'usure [49]. A. Koffi, D. Koffi et L. Toubal (2020) [17] ont effectué des tests sur des échantillons de composite à fibres de bouleau. Ils ont constaté que la teneur en fibres a amélioré également la résistance à l'impact ainsi qu'elle a augmenté la rigidité du matériau et la contrainte maximale. En conséquence, le PEHD renforcé de fibres de bouleau pourrait être une meilleure alternative à plusieurs polymères.

La Figure IV-12 montre l'effet du pourcentage de fibres et le couple sur la variation de l'usure sur les roues menées pour une vitesse de 1 000 tr/min.

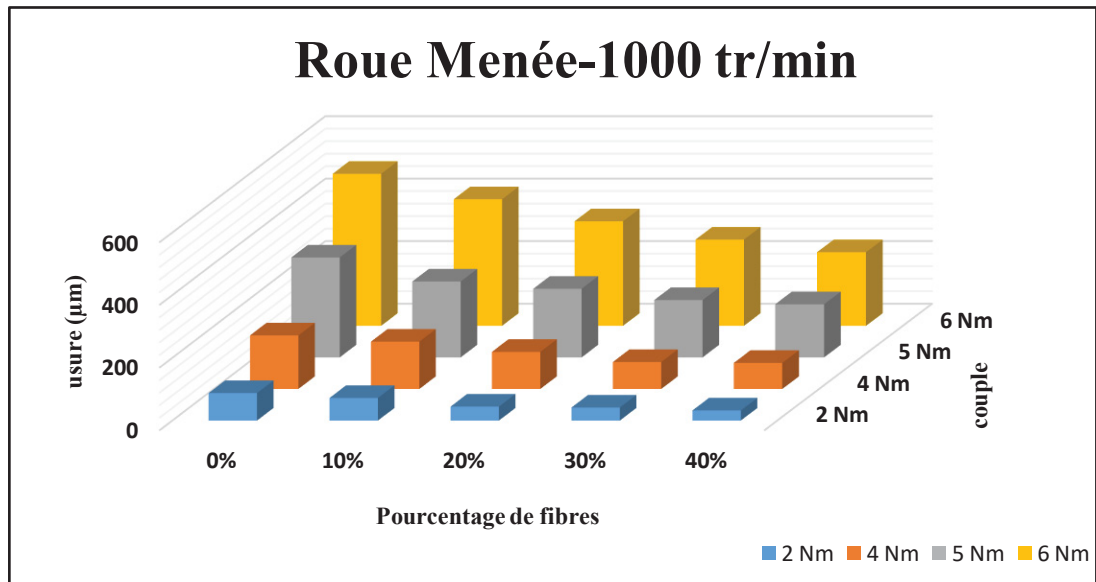


Figure IV-12: Usure (μm) en fonction des pourcentages de fibres et les couples pour la roue menée à 1 000 tr/min

Il est constaté que l'usure diminue significativement avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans le composite, mais par contre elle augmente avec l'augmentation du couple.

Koffi, D., & Mahrouk, A. (2020) [50] ont étudié le comportement à l'usure, en termes de perte de masse, du composite HDPE renforcé de fibres de bouleau.

En effet, la valeur de perte de masse dans les engrenages est inversement proportionnelle au pourcentage de fibres dans le composite. Il est constaté aussi que la perte de masse augmente avec l'augmentation du couple appliqué.

D'après l'étude de la vitesse 1 500 tr/min et pour les paires de roues, on arrive aux mêmes constatations que pour une vitesse de 1 000 tr/min et 500 tr/min.

IV.2.3 Influence des paramètres de fonctionnement sur l'usure

IV.2.3.1 Effet du couple

Les résultats ont permis de tracer la courbe de l'usure en fonction des charges appliquées. La Figure IV-13 montre le comportement à l'usure des engrenages en composite de fibres de bouleau obtenues après les essais pour une vitesse de rotation de 1 000 tr/min.

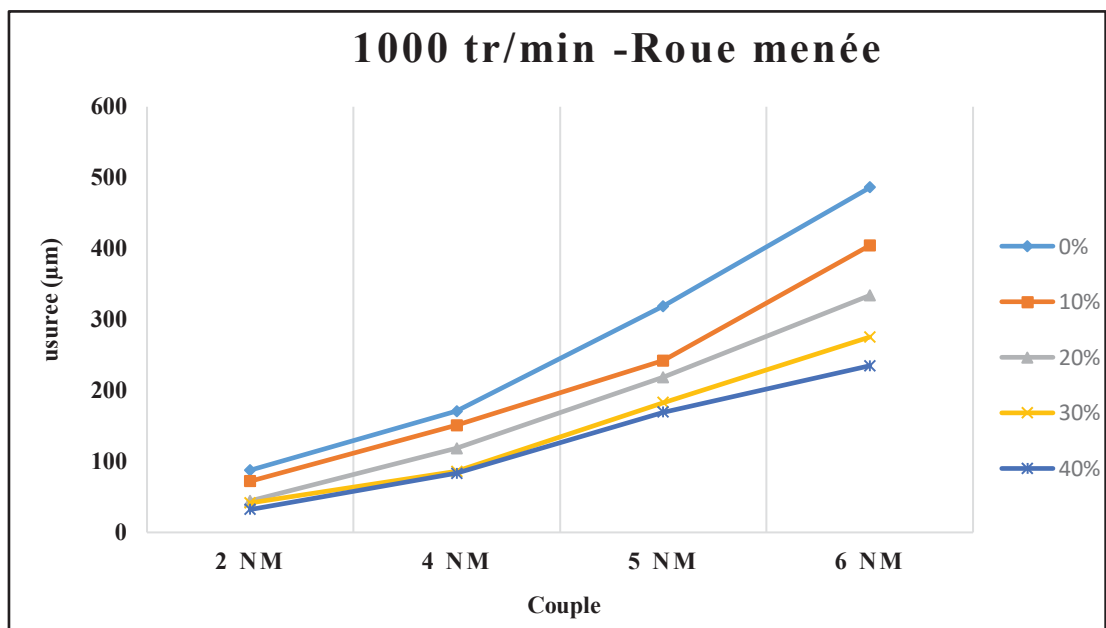


Figure IV-13: Usure (μm) en fonction du couple appliqué pour la roue menée à 1 000 tr/min

Pour la roue menée, il est constaté que l'usure augmente avec le couple pour les différents pourcentages de fibres et pour une vitesse fixe. Elle augmente de façon linéaire ce qui mène à une usure plus importante au fur et à mesure que la charge augmente. D'ailleurs, Mao, K., Greenwood, D., Ramakrishnan, R., Goodship, V., Shrouti, C., Chetwynd, D., et Langlois, P. [39] ont montré que l'usure augmente faiblement avec l'augmentation du couple avant d'arriver au

couple critique de 7.5 N.m où l'usure augmente remarquablement et cela est généralement dû à la température.[37].

Les résultats obtenus ont permis de tracer la courbe du comportement de l'usure pour la roue menant pour une même vitesse de 1 000 tr/min (Figure IV-14).

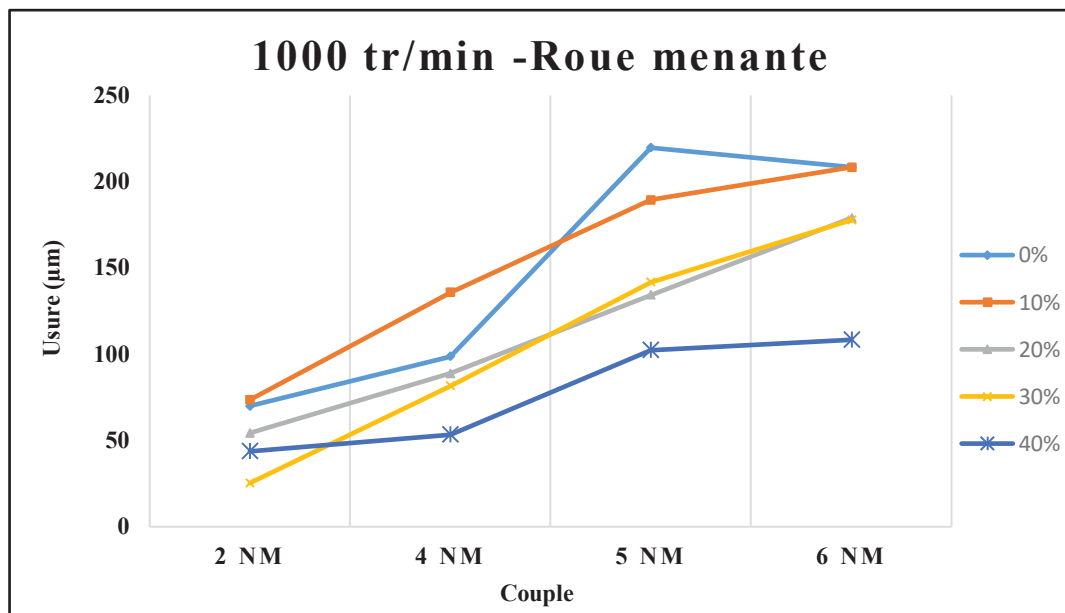


Figure IV-14: Usure (µm) en fonction du couple appliqué pour la roue menante à 1 000 tr/mi

D'après la courbe de la Figure IV-14, il est constaté que même pour la roue menante, l'usure augmente avec le couple. Par contre l'usure dans la roue menée est plus sévère que dans la roue menante, ce qui est confirmé par les résultats qui présentent l'effet de la teneur en fibres.

Pour un taux de fibres de 30 % et 20 %, la Figure IV-15 montre le comportement à l'usure des engrenages en fonction des quatre couples et pour les trois vitesses de rotation.

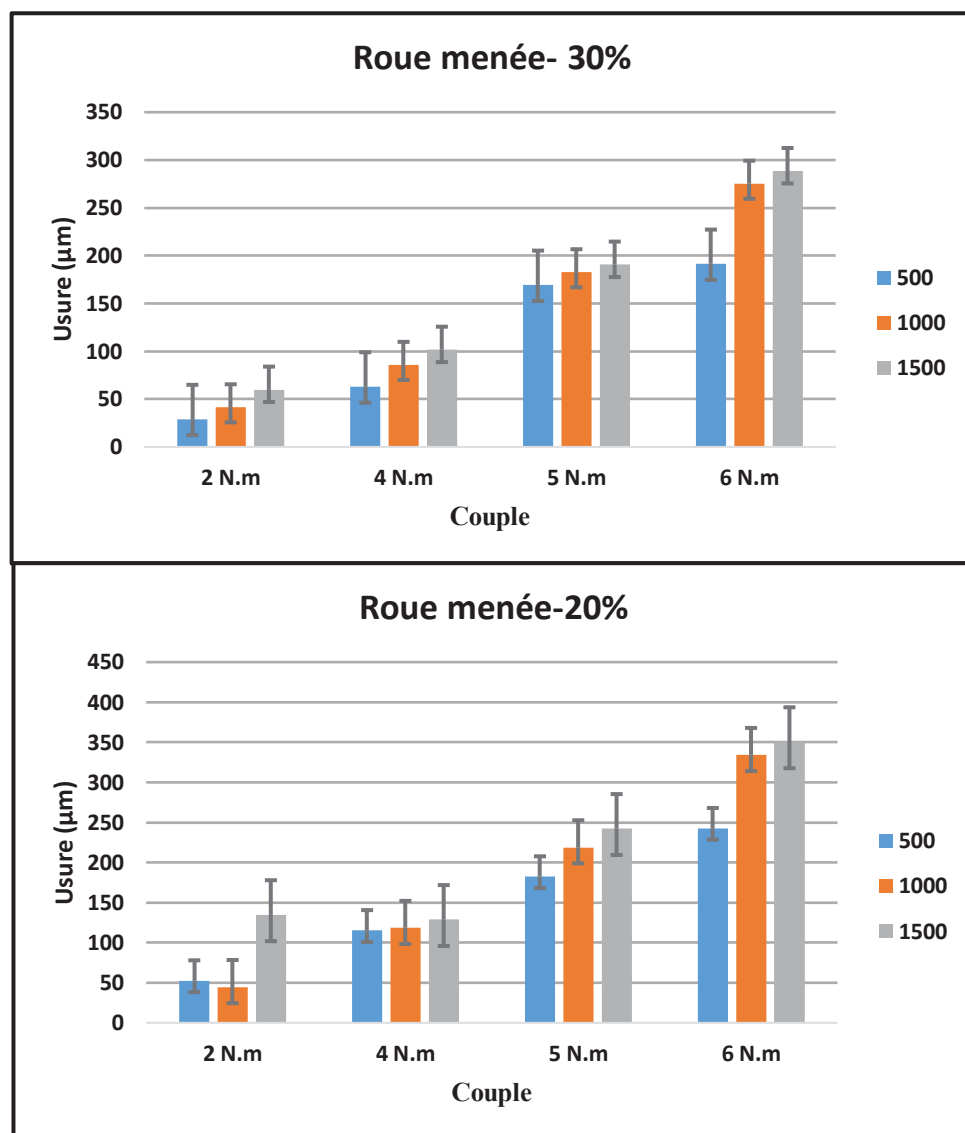


Figure IV-15: L'usure (μm) en fonction du couple et vitesse pour un pourcentage de 30 % et 20 % de fibres

Il est observé que l'usure augmente d'une façon linéaire avec les couples de 2 Nm, 4 Nm, 5 Nm et 6 Nm et pour les trois vitesses de rotation (500 tr/min ; 1 000 tr/min ; 1 500 tr/min).

D'après les résultats observés pour les autres pourcentages de fibres, il est constaté que l'usure se comporte de la même manière. D'ailleurs, K. Wotodzo, K. A. Kassegne, D. Koffi, S. Tiem et A. Batako [51] ont trouvé que lorsque le couple

augmente, les contraintes de contact et les contraintes de flexion au pied de la dent augmentent.

De plus, au fur et à mesure que l'usure augmente, les contraintes de flexion augmentent puisque l'usure cause une perte de matière qui affaiblit la dent.

IV.2.3.2 Effet de la vitesse

Dans cette section, on traite de l'effet de la vitesse de rotation sur le comportement à l'usure des engrenages en composite à fibres de bouleau.

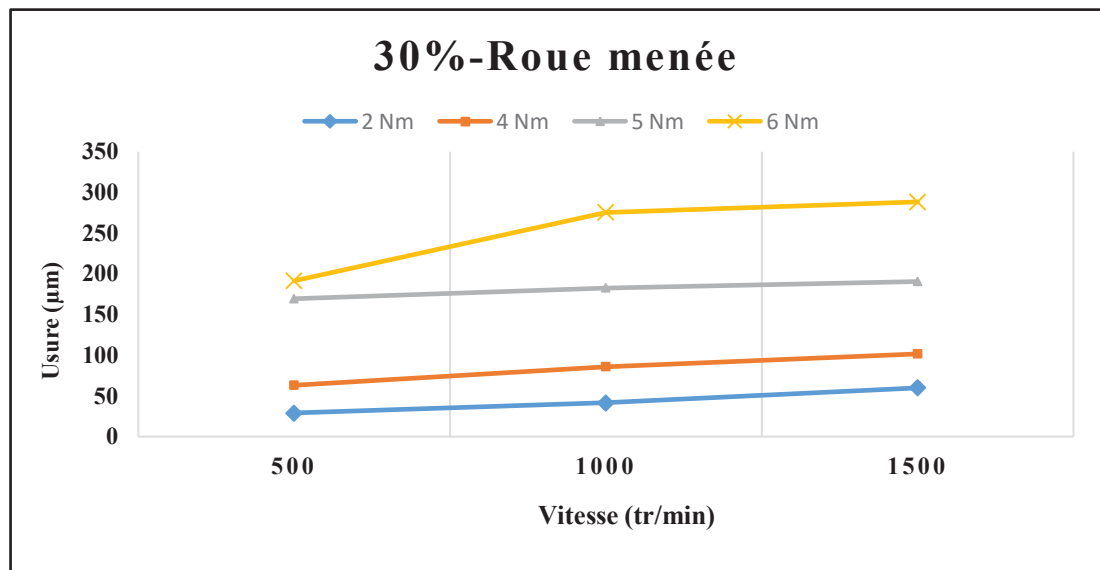


Figure IV-16: L'usure (µm) en fonction de la vitesse de rotation pour la roue menée de 30 % de fibres

La Figure IV-16 montre que pour un pourcentage de fibres de 30 %, l'usure augmente presque linéairement et moins sévèrement avec la vitesse de rotation.

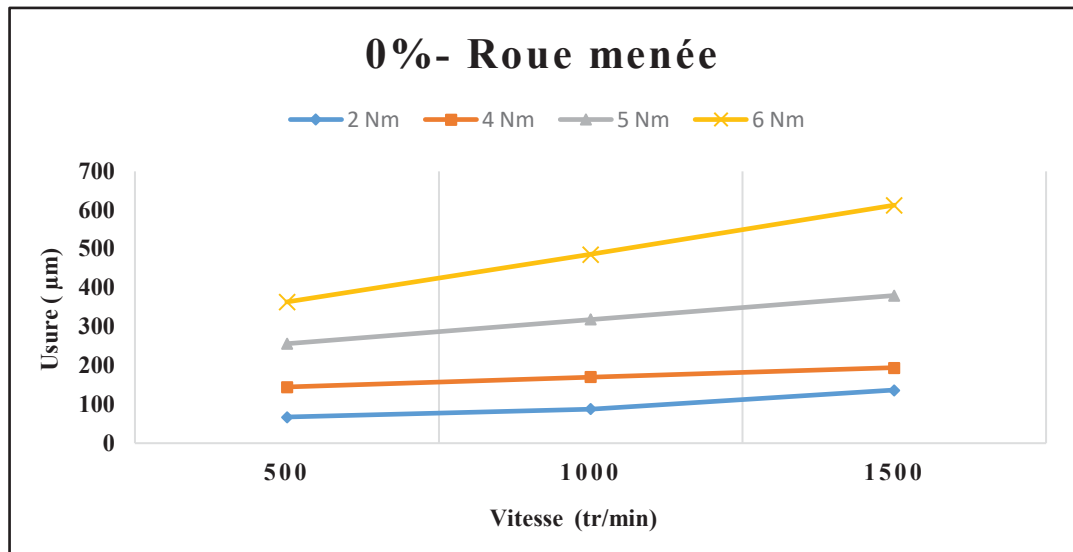


Figure IV-17: L'usure (μm) en fonction de la vitesse de rotation pour la roue menée de 0 % de fibres

Les résultats pour un pourcentage de fibres de 0 %, c'est-à-dire le PEHD pur, montre que l'usure augmente de la même façon avec la vitesse de rotation, mais elle est plus importante comparée aux résultats du pourcentage de 30 % (Figure IV-17).

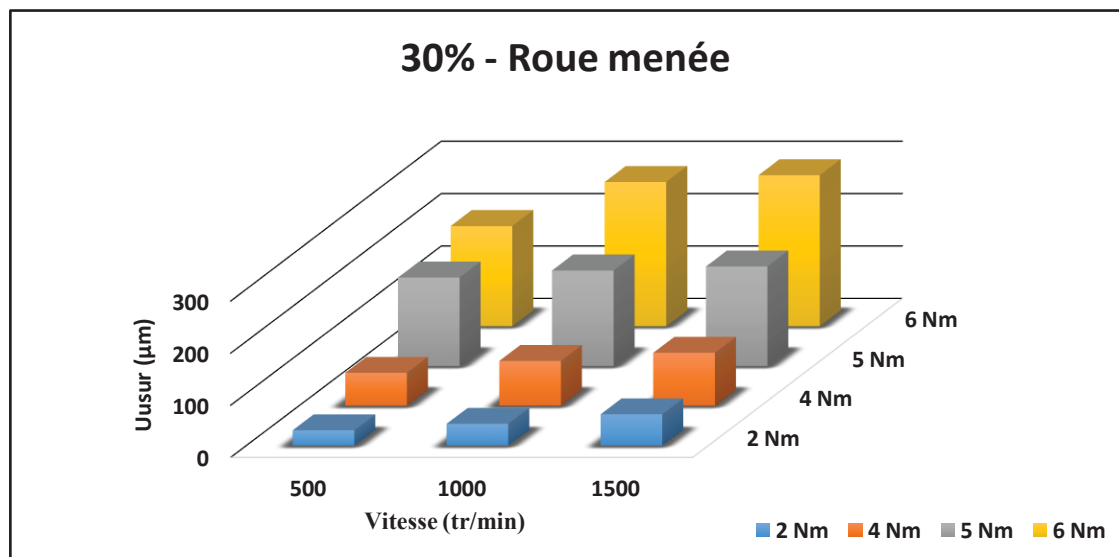


Figure IV-18: L'usure (μm) en fonction de la vitesse et couple pour la roue menée en 30 % de fibres

La Figure IV-18 montre que l'usure augmente, que ça soit avec la vitesse de rotation ou le couple, ce qui confirme les résultats constatés dans les sections

précédentes. En comparant ces résultats avec ceux de la roue menante, l'usure est moins sévère pour cette dernière. En addition, pour un pourcentage de 0 %, 10 %, l'usure est plus importante comparée à celle des engrenages avec un pourcentage de 30 %.

IV.2.3.3 Effet de la position sur l'usure

Dans cette section, les résultats obtenus précédemment permettront de mettre en évidence le comportement à l'usure pour les cinq positions sur le flanc de la dent définies précédemment.

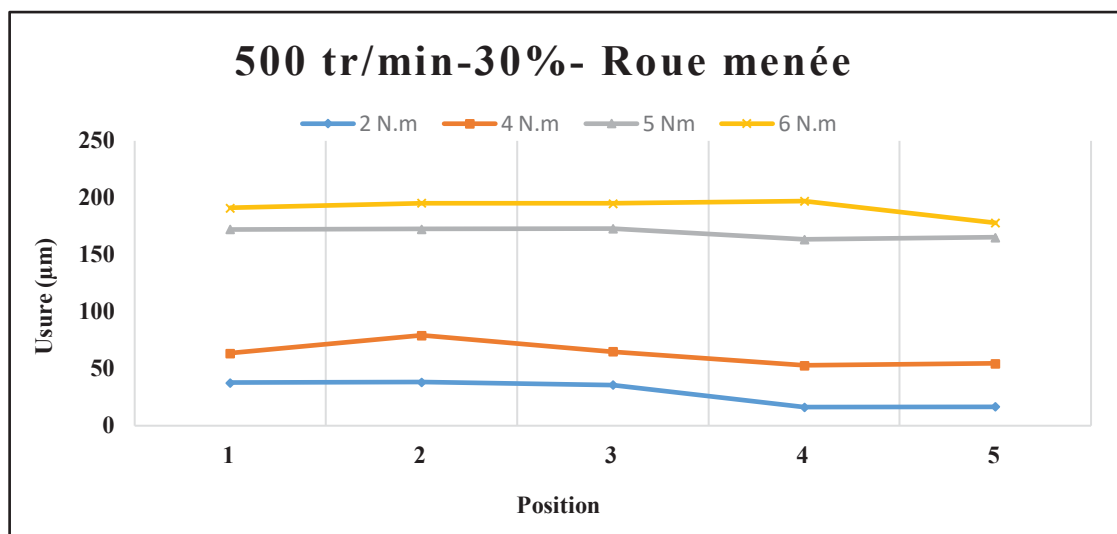


Figure IV-19: L'usure (µm) en fonction des positions pour une vitesse de 500 tr/min et un pourcentage de 30 % de fibres

La Figure IV-19 montre que l'usure est quasi-stable tout au long des cinq positions sur le flanc de la dent.

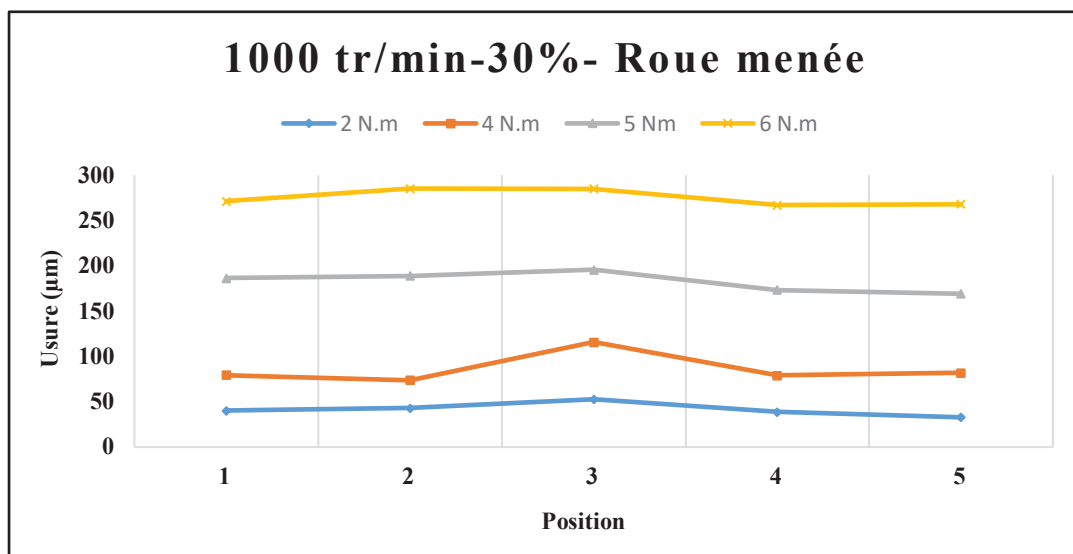


Figure IV-20: L'usure (μm) en fonction des positions pour une vitesse de 1 000 tr/min et un pourcentage de 30 % de fibres

Les résultats ont permis de tracer la courbe de l'usure en fonction des cinq positions à une vitesse de rotation de 1 000 tr/min pour les engrenages à 30 % de fibres (Figure IV-20). Il est observé que l'usure est presque constante tout au long du flanc de la dent, mais avec quelques différences et cela revient généralement à la présence des fibres sur les parties usées de la dent d'engrenage.

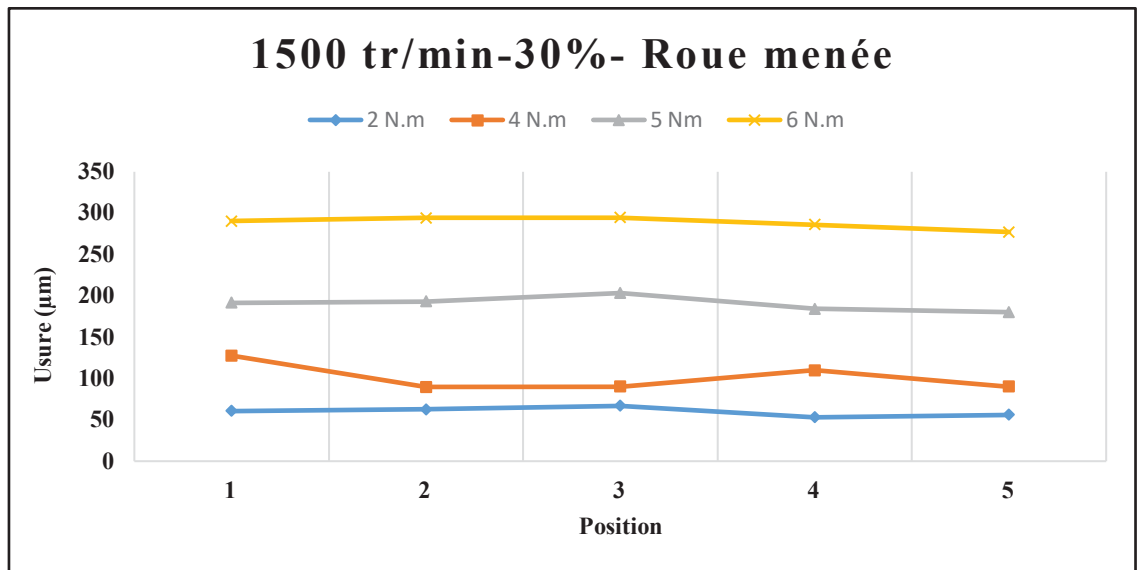


Figure IV-21: L'usure (μm) en fonction des positions pour une vitesse de 1 500 tr/min et un pourcentage de 30 % de fibres

Pour une vitesse de 1 500 tr/min (Figure IV-21) l'usure se comporte semblablement au comportement pour les autres vitesses, mais elle plus sévère en termes de réduction de largeur de la dent.

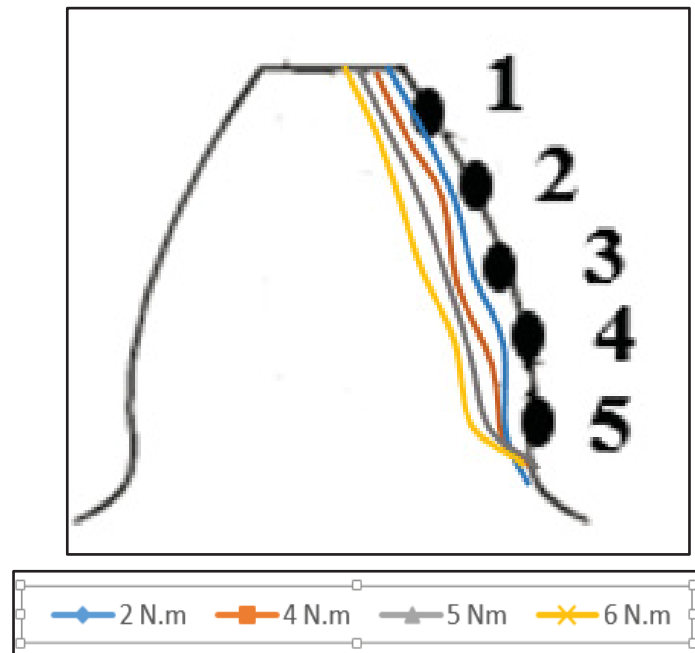


Figure IV-22: Schématisation du changement du profil de la dent pour chaque couple à 30 % de fibres

La Figure IV-22 présente la forme de l'usure sur la dent d'engrenage en termes d'épaisseur pour les quatre couples 2, 4,5 et 6 Nm et un taux de fibres de 30 %. La forme de la dent diminue au niveau de la largeur avec l'augmentation du couple et de la vitesse. Cependant, le comportement à l'usure au point primitif 3 n'est pas nul comparé aux engrenages métalliques [52]. D'ailleurs, pour ces derniers, l'usure est maximale au sommet et au pied de la dent.

CHAPITRE V –CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

V.1 Récapitulation

Les matériaux composites à fibres naturelles sont considérés comme une alternative aux métaux puisqu'elles présentent plusieurs avantages. Cependant, l'usure présente un problème majeur dans l'utilisation de ces matériaux. Ce mémoire a été réalisé pour étudier les performances tribologiques du composite polyéthylène à haute densité renforcé par les fibres de bouleau.

Dans le premier chapitre, il s'agissait d'une introduction sur les engrenages, matériaux composites et polymères, l'utilisation des matériaux composites et plastiques dans les engrenages ainsi qu'une définition des fibres naturelles. Le chapitre traite également des problématiques, des questions de la recherche, de l'objectif principal et des objectifs secondaires.

Le second chapitre est divisé en deux parties. La première présente le cadre théorique qui donne une idée sur la tribologie des matériaux pour les engrenages et les modes d'endommagement des engrenages en plastique et plus précisément l'usure et ces méthodes de mesures. La deuxième partie présente une revue de littérature sur le comportement tribologique des matériaux polymères et composites à fibres naturelles.

Le chapitre trois a été consacré à la méthodologie de travail en présentant les matériaux utilisés (matrice, fibre et agent de couplage), préparation des échantillons à l'aide du moulage par thermocompression et l'étude expérimentale.

Le chapitre quatre contient deux grandes parties. La première présente les résultats des mesures de l'usure pour les différents échantillons, en détaillant les moyens et les paramètres utilisés. La deuxième partie présente l'observation du

comportement de l'usure en fonction des paramètres suivants : vitesse de rotation, couple, pourcentage de fibres et la position sur la dent d'engrenage.

Le chapitre cinq est consacré à une récapitulation des chapitres précédents et les conclusions du travail de recherche ainsi que les recommandations pour les futurs chercheurs.

V.2 Discussions et conclusions

La revue de littérature, étudiée en relation avec le travail effectué sur les engrenages, a permis de construire une idée sur les travaux des autres chercheurs : les méthodologies, les moyens de mesure de l'usure, les paramètres de fonctionnement et les résultats obtenus. Cela a aidé à détailler la méthodologie pour ce travail afin de déterminer le comportement à l'usure en termes métrologiques pour les engrenages en composite à fibres de bouleau.

La machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) a été utilisée afin de déterminer les coordonnées des points sur le flanc de la dent avant et après essai. Les résultats ont donné la possibilité de calculer l'usure pour chaque paire d'engrenages. Cependant, l'usure sur les roues menées est généralement plus grande que celle sur les roues menantes, ce qui ne pouvait pas être prédit par la mesure de perte de couple.

Les échantillons d'engrenages avec des pourcentages de 30 % et 40 % en fibres donnent de meilleurs résultats comparés aux engrenages avec les autres pourcentages de fibres. Par ailleurs, avec l'augmentation de la vitesse de rotation et le couple l'usure augmente, mais en augmentant le pourcentage de fibres l'usure diminue.

L'étude de l'usure en fonction de la position sur le flanc de la dent joue un rôle dans la détermination de la forme finale des engrenages après essai. Cependant, l'usure

est quasi-constante sur le flanc de la dent et n'est pas nulle au point primitif. En plus, l'épaisseur des dents diminue en augmentant le couple et la vitesse.

En comparant les résultats de la caractérisation métrologique de l'usure sur les dents d'engrenages avec les résultats de l'usure en termes de perte de masse [50], il est constaté que l'usure se comporte de la même manière. En effet, la perte de masse augmente avec le couple et la vitesse et elle diminue quand le taux de fibres est important dans le composite.

V.3 Recommandations et perspectives

L'étude du comportement tribologique des engrenages en composite à fibres naturelles est un domaine vaste, ce qui permet d'ouvrir plusieurs branches de recherche. Pour cela, nous recommandons de :

- Effectuer l'étude de vibration et la fatigue pour les engrenages en composite à fibres de bouleau.
- Faire une étude sur le comportement en rupture au niveau du pied de la dent en liaison avec les fissures microscopiques, ce permettra de minimiser les dégâts.
- Effectuer une étude sur l'usure en utilisant un transformateur différentiel variable linéaire, profilomètre ou la méthode de ferrographie pour comparer les résultats trouvés à l'aide des autres méthodes.

BIBLIOGRAPHIE

1. https://prod-maint-indus.pagesperso-orange.fr/dr/Les_engrenages.pdf.
2. https://www.arts-et-metiers.net/sites/arts-et-metiers.net/files/asset/document/cp_engrenages.pdf.
3. <http://dessineux.pam.free.fr/A%20telecharger/EngrePierre10.pdf>.
4. Ekundayo, G. and S.B. Adejuyigbe, *Reviewing the Development of Natural Fiber Polymer Composite: A Case Study of Sisal and Jute*. American Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2019. **3**: p. 1-10.
5. Cathelin, J., E. Letzelter, M. Guingand, J.-P. De Vaujany and L. Chazeau (2013). 'Experimental and numerical study of a loaded cylindrical PA66 gear.' Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 135(4): 041007.
6. Nguyen, D. C. (2016). *Fibre/matrix interface characterization : application to hemp fiber/polypropylene composites. Caractérisation de l'interface fibre/matrice : application aux composites polypropylène/chanvre*. Université de Technologie de Troyes. Repéré à <http://www.theses.fr/2016TROY0009/document>
7. Sullins, T., Pillay, S., Komus, A., & Ning, H. (2017). Hemp fiber reinforced polypropylene composites: The effects of material treatments. *Composites Part B: Engineering*, 114, 15-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.001>
8. Céline, G.-S., *Procédé d'élaboration d'agromatériau composite naturel par extrusion biva et injection moulage de tourteau de tournesol*. 2006, Institut National Polytechnique de Toulouse. école doctorale : Transferts, Dynamique des Fluides, Energétique et Procédé, 2006. - p. 381. Repéré à <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000325/> :
9. Naidu, A.L., V. Jagadeesh, and M.R. Bahubalendruni, *A review on chemical and physical properties of natural fiber reinforced composites*. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology, 2017. **8**(1): p. 56-68.
10. Deepak, P., et al., *Study of Wear Properties of Jute/Banana Fibres Reinforced Molybdenum disulphide Modified Epoxy Composites*. Materials Today: Proceedings, 2017. **4**(2, Part A): p. 2910-2919.

11. Berthlot, J.-M., *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures*. TEC & DOC, 2005. **4e édition**: p. 645.
12. Ndazi, B.S., J.V. Tesha, and E.T.N. Bisanda, *Some opportunities and challenges of producing bio-composites from non-wood residues*. Journal of Materials Science, 2006. **41**: p. 6984-6990.
13. Shalwan, A. and B.F. Yousif, *In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres*. Materials & Design, 2013. **48**: p. 14-24.
14. Abanto, F.S., *Développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium*, in *sciences du bois*. 2018, Université de LAVAL: Québec, Canada.
15. https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouleau_jaune.
16. L. Robitaille et M. Roberge, L.s.d.b.j.a.Q. and a.e.d.Q.a.P. « Le bouleau jaune.
17. Koffi, A., D. Koffi, and L. Toubal, *Mechanical properties and drop-weight impact performance of injection-molded HDPE/birch fiber composites*. Polymer Testing, 2020: p. 106956.
18. O, V., *Fundamentals of Friction and Wear*. Engineered Materials for Advanced Friction and Wear Applications : Conference Proceedings, 1998: p. 1-9. Gaithersburg, Maryland, USA 1-3 March
19. Bravo, A., et al., *Life and damage mode modeling applied to plastic gears*. Engineering Failure Analysis, 2015. **58**: p. 113-133.
20. Devaraju, A., *A critical review on different types of wear of materials*. Int. J. Mech. Eng. Technol, 2015. **6**(11): p. 77-83.
21. G T, M., et al., *Wear behaviour studies on Grewia Serrulata bast fibre reinforced polymer composites*. Cogent Engineering, 2018. **5**(1): p. 1-1.
22. BARRAU, O., *ÉTUDE DU FROTTEMENT ET DE L'USURE D'ACIER À OUTILS DE TRAVAIL À CHAUD*. 2004, l'Institut National Polytechnique de Toulouse: Toulouse, France.[thèse de doctorat non publiée]. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000080/>
23. Yaltese, M., L. Boulanouar, and S. Belhadi, *Étude de l'endommagement des outils de coupe en céramique noire et en CBN lors du tournage d'un acier durci*. 2021.*Mécanique Appliquée et Théorique*. **Vol.1, 5** : p. 323-339
24. Lefevre, R., *Graissage et tribotechnique. v. I v. I*. 1975, Paris: Technip.

25. Barwell, F.T., *Wear of metals*. *Wear*, 1958. **1**(4): p. 317-332.
26. Archard, J.F., *Contact and Rubbing of Flat Surfaces*. *Journal of Applied Physics*, 1953. **24**: p. 981.
27. Meng, H.C. and K.C. Ludema, *Wear models and predictive equations: their form and content*. *Wear*, 1995. **181-183**: p. 443-457.
28. Fillot, N., *ÉTUDE MÉCANIQUE DE L'USURE - Modélisation par Éléments discrets des débits de troisième corps solide* -. thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2004, 199 p.
29. N. Agbetossou , A.A., K. Attipou , KA Kassegne, D. Koffi, S. Tiem, *Modeling and Prediction of Wear for Gears in Plastic Materials and Their Composites*. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) 2020. **Volume 09**.
30. Zhang, Y., et al., *A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears*. *Tribology International*, 2020. **141**: p. 105953.
31. Brandão, J.A., et al., *Measurement of mean wear coefficient during gear tests under various operating conditions*. *Tribology International*, 2016. **102**: p. 61-69.
32. Wright, N.A. and S.N. Kukureka, *Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears*. *Wear*, 2001. **251**(1): p. 1567-1578.
33. Lin, J., et al., *A quantitatively distributed wear-measurement method for spur gears during micro-pitting and pitting tests*. *Tribology International*, 2021. **157**.
34. Potapov, K.G., *Phase-Chromatic Control of Wear of the Working Profiles of the Gear Wheels of a Reduction Gear in the Course of Operation*. *Measurement Techniques*, 2013. **56**(9): p. 1048-1053.
35. Evans, S.M. and P.S. Keogh, *Wear mechanisms in polyoxymethylene spur gears*. *Wear*, 2019. **428-429**: p. 356-365.
36. Li, W., et al., *An investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements*. *Wear*, 2011. **271**(9): p. 2176-2183.
37. Soudmand, B.H. and K. Shelesh-Nezhad, *Failure and wear analysis of poly(butylene terephthalate) nanocomposite spur gears*. *Tribology International*, 2020. **151**: p. 106439.

38. Singh, P.K., Siddhartha, and A.K. Singh, *An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears*. Tribology International, 2018. **118**: p. 264-272.
39. Mao, K., et al., *The wear resistance improvement of fibre reinforced polymer composite gears*. Wear, 2019. **426-427**: p. 1033-1039.
40. Yousif, B. and N.s.M. El-Tayeb, *The effect of oil palm fibers as reinforcement on tribological performance of polyester composite*. Surface Review and Letters (SRL), 2007. **14**: p. 1095-1102.
41. El-Tayeb, N.S.M., *A study on the potential of sugarcane fibers/polyester composite for tribological applications*. Wear, 2008. **265**(1): p. 223-235.
42. Sharma, A., S. Suresh, and A. Dubey, *Properties and Characteristics of Sisal Fibre Reinforced Composite*. Advanced Materials Research, 2012. **585**: p. 322-326.
43. Chand, N. and U. Dwivedi, *Sliding wear and friction characteristics of sisal fibre reinforced polyester composites: Effect of silane coupling agent and applied load*. Polymer Composites, 2008. **29**: p. 280-284.
44. El-Sayed, A.A., et al., *Friction and wear properties of polymeric composite materials for bearing applications*. Wear, 1995. **184**(1): p. 45-53.
45. Manai, F., *Étude des performances de tribologie des composites de fibres naturelles thermoplastiques/bouleau : frottement et usure*. Mémoire de maîtrise, 2019, Département de génie mécanique, UQTR.
46. Mijiyawa, Fayçal (2018). *Formulation, caractérisation, modélisation et prévision du comportement thermomécanique des pièces plastiques et composites de fibres de bois : application aux engrenages = Formulation, characterization, modeling and prediction of the thermomechanical behavior of plastic parts and wood fiber composites : applications to gears*. Thèse. Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 256 p.
47. Teixeira Alves et al. (2013) Designing and Manufacturing Spiral Bevel Gears Using 5-Axis Computer Numerical Control (CNC) Milling Machines, J. Mech. Des., 2, vol. 135, 24502. doi:10.1115/1.4023153.
48. Ristić, D., 2009. "Numerical model for the critical stress determination in spur gears". Scientific Technical Review, LVIX(1), pp. 78–86.
49. Eleiche, A.M. and G.M. Amin, *The effect of unidirectional cotton fibre reinforcement on the friction and wear characteristics of polyester*. Wear, 1986. **112**(1): p. 67-78.

50. Koffi, D. and A. Mahrouk, *Étude comparative du comportement de tribologie des composites de fibres naturelles(HDPE/Bouleau) par essai analytique normalisé et avec des engrenages*. 2020.
51. Wotodzo, K., et al., *A numerical simulation of the influence of torque on the performance of composite gears*. Materials Today: Proceedings, 2021. **46**.
52. Flodin, A., *Wear investigation of spur gear teeth*. Tribotest, 2000. 7(1): p. 45-60.