

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**ÉTUDES ANALYTIQUES ET EXPÉRIMENTALES DU COMPORTEMENT EN
FATIGUE PAR FLEXION DES DENTS D'ENGRENAGE EN BIOCOMPOSITE
BOULEAU/POLYÉTHYLÈNE**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE-CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE**

Par

MARIEL LAVOISIER TCHOUPOU AKONO

JUILLET 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE (M. Sc. A)

Direction de recherche :

Lotfi Toubal, ing., Ph.D, Professeur titulaire, UQTR	directeur de recherche
--	------------------------

Demagna Koffi, ing., Ph.D, Professeur titulaire, UQTR	codirecteur de recherche
---	--------------------------

Jury d'évaluation :

Lotfi Toubal, ing., Ph.D, Professeur titulaire, UQTR	membre interne
--	----------------

Guyh Dituba Ngoma, ing., Ph.D, Professeur titulaire, UQAT	membre externe
---	----------------

Ayarema Afio, Ph.D, Professeur, École Polytechnique de Lomé	membre externe
---	----------------

Dédicaces

À mon père, Monsieur Jules Akono

Merci infiniment, papa, pour tout ce que tu fais et pour ton amour inconditionnel. Mon souhait le plus cher est de devenir un père aussi remarquable que toi envers nous, tes enfants. Grâce à tes efforts, mes frères et moi avons pu poursuivre de belles études enrichissantes dans de prestigieuses écoles. Papa, je suis profondément reconnaissant de t'avoir comme père. Je souhaite que tu restes toujours en bonne santé et que tu bénéficies d'une longue vie sur cette terre. Je t'aime énormément, papa.

À ma mère, Madame Katherine Akono

Un immense merci, maman, pour tout ce que tu fais et pour ton amour infini. Ta simplicité nous a enseigné des valeurs telles que l'humilité, la gentillesse et l'amour du prochain. On me qualifie souvent de trop gentil, et ma réponse reste toujours que cela vient de toi, maman. Merci pour l'éducation exceptionnelle que tu nous as donnée. Une mère comme toi est irremplaçable. Je te souhaite également une santé florissante et une vie longue et épanouissante sur cette terre. Je t'aime infiniment, maman Cathy.

À mes frères et sœurs/ Gabin, Aude, Snell et Ange

Merci de faire partir de ma vie, Je suis reconnaissant de tout l'amour que vous me portez. Je souhaite que nos liens de fraternités demeurent une force pour nous tous. Je vous souhaite le bonheur dans vos vies. Je vous aime.

Remerciements

Au moment où ce travail se finalise, je voudrais exprimer ma reconnaissance à toutes ces personnes ayant contribué à ma formation et à l'aboutissement de ce travail. Je tiens à remercier :

- Premièrement, mon directeur de recherche le Professeur Lotfi Toubal, Merci professeur d'avoir accepté de diriger mes travaux. Je suis reconnaissant de tout le soutien dont vous m'aviez apporté tout au long de mon projet de maîtrise. Merci grandement pour toutes les bourses de soutiens dont vous m'aviez fait bénéficier.
- Deuxièmement, mon codirecteur de recherche le Professeur Demagna Koffi, Merci professeur de m'avoir accueilli au sein du département de génie mécanique, et d'avoir accepté de diriger mes travaux. Votre positivité m'a profondément influencé tout au long de mon projet de maîtrise.
- Je tiens à remercier tous les professeurs et le personnel du département de génie mécanique pour leur engagement à notre formation. Sincèrement merci
- Je souhaite exprimer ma reconnaissance spéciale envers Philippe Blais pour sa disponibilité et l'assistance technique précieuse qu'il m'a accordée tout au long de mes essais de fatigue.
- J'adresse mes remerciements à mon ami Médard Seria pour sa disponibilité et pour son expertise en programmation dont j'ai fortement bénéficié pour l'élaboration du code python pour le traitement de mes données de fatigue.
- J'exprime ma gratitude envers l'ensemble de mes collègues de laboratoire : Abdelaziz Boucetta, Abdelhadi Hadj-Djilani, Abdelhadi Blal, Khaled Nasri, El Mehdi El Mekhchi, Samuel Hénault, René-Fabrice. Merci pour votre disponibilité et le partage de vos connaissances.

Résumé

Ce travail de recherche, mené dans le cadre de notre projet de maîtrise, porte sur l'étude analytique et expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des dents d'engrenage en biocomposite polyéthylène haute densité renforcé par des fibres courtes de bouleau jaune. Le but de ce travail de recherche est d'étudier, dans un premier temps, le comportement en statique des biocomposites afin d'évaluer les propriétés mécaniques de base du matériau à l'échelle de la pièce (module de flexion, raideur, contrainte maximale de flexion, déplacement et déformation élastique max). Dans un deuxième temps, d'étudier le comportement en fatigue des biocomposites à différents taux de fibres (0 à 30 % en masse) dans le but d'évaluer leurs durées de vie et de quantifier l'évolution de l'endommagement de ceux-ci. Pour parvenir à nos objectifs, en ce qui concerne l'étude en statique, nous l'avons abordée suivant deux approches : une approche analytique et une approche expérimentale basée sur la corrélation d'images. Les résultats de cette étude montrent un faible écart entre les deux modèles développés et l'apport des fibres à la matrice thermoplastique HDPE s'est fait ressentir sur les propriétés mécaniques du matériau; le module de flexion du matériau à l'échelle de la pièce (de la dent) croît avec le pourcentage des fibres dans le biocomposite, ce qui est satisfaisant et permet de comparer les performances du biocomposite avec des thermoplastiques techniques comme le nylon. En ce qui concerne l'étude en fatigue, nous l'avons abordée par une approche expérimentale avec des tests de fatigues réalisés sur les engrenages renforcés de 20 % et 30 % de fibres de bouleau (pourcentage massique) ainsi que sur les engrenages non renforcés; les niveaux de chargement des tests de fatigue ont été fixés grâce aux résultats de l'étude en statique. Les durées de vie ont été mesurées et l'endommagement des échantillons a été évalué avec deux indices, notamment la résistance résiduelle et la propagation de la fissure dans les arrondis des pieds des dents. Les durées de vie moyennes des biocomposites ont été déterminées pour chaque niveau de déplacement imposé et les résultats des indices d'endommagement montrent que la présence des fibres de bouleau retarde l'évolution de la fissure, ce qui augmente la durée de vie des biocomposites.

Mots clés : composite, fibres naturelles, thermoplastique, engrenage, fatigue

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	iii
Remerciements.....	iv
Résumé.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des Figures	ix
Liste des Tableaux.....	xii
Liste des Abréviations.....	xiv
 Chapitre 1 - Introduction.....	 1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Problématique	3
1.3 Questions de recherches.....	4
1.4 Objectifs.....	4
1.5 Structure du mémoire.....	6
 Chapitre 2 - Revue de la littérature	 7
2.1 Introduction.....	7
2.2 Matériaux pour les engrenages	8
2.3 Composites à fibres naturelles	8
2.3.1 Matrice thermoplastique	9
2.3.2 Fibres naturelles.....	11
2.4 Travaux récents consultés et résultats pertinents sur les composites à fibres naturelles.....	16
2.5 Modes d'endommagement des engrenages plastiques et biocomposites	22
2.6 Approche de modélisation de l'endommagement par fatigue	26
2.7 Fatigue à la racine de la dent	27

2.8	Synthèse de la revue de littérature et originalité de ce mémoire	29
Chapitre 3 - Méthodologie		31
3.1	Introduction.....	31
3.2	Matériau et Fabrication.....	31
3.3	Étude en statique du comportement en flexion d'une dent d'engrenage en biocomposite	38
3.3.1	Approche analytique.....	38
3.3.2	Approche expérimentale : Réalisation des essais quasi statiques de flexion sur des dents d'engrenages et utilisation de la corrélation d'images pour analyser les déformations et les déplacements	43
3.4	Étude en fatigue du comportement en flexion d'une dent d'engrenage en biocomposite	46
3.4.1	Méthodes et outils de mesure	46
3.4.2	Essai de fatigue.....	48
3.5	Conclusion	50
Chapitre 4 - Analyses et interprétations des résultats		51
4.1	Introduction.....	51
4.2	Analyses et interprétations des résultats de l'étude en statique	51
4.3	Analyses et interprétations des résultats de l'étude en fatigue	57
4.3.1	Durées de vie	58
4.3.2	Indices d'endommagements	60
4.4	Conclusion	67
Chapitre 5 - Conclusion générale et Perspectives		68
5.1	Récapitulation	68
5.2	Conclusion et Perspectives	69
Bibliographie.....		71
Annexes.....		A1
Annexe 1 : Caractéristiques géométriques de la roue dentée : Calcul de L, F		A1
Annexe 2 : Facteur de forme de Lewis Y en fonction du nombre de dents et de l'angle de pression pour les engrenages plastiques [48]		A2

Annexe 3 : Programme Python pour les résistances résiduelles..... A3

Liste des Figures

Figure 1.1 : Produits fabriqués par l'industrie papetière au Québec en 1999	1
Figure 1.2 : Quelques applications non structurales des matériaux lignocellulosiques/polymères	2
Figure 1.3 : Évolution des échantillons utilisés et des types de tests établis.	5
Figure 2.1 : Classification des thermoplastiques	10
Figure 2.2 : Classification des fibres naturelles.	12
Figure 2.3 : Différentes couches constitutives d'un tronc d'arbre	14
Figure 2.4 : Arbre de bouleau	15
Figure 2.5 : Comparaison des modules de flexion du composites HDPE/40%Bouleau avec des thermoplastiques usuels.....	21
Figure 2.6 : Modes d'endommagement des engrenages	22
Figure 2.7 : Modes d'endommagement en fonction de la charge	23
Figure 2.8 : Rupture en flexion par fatigue au pied d'une dent	28
Figure 2.9 : Banc essai utilisé par P. Blais pour isoler la flexion de la dent	29
Figure 3.1 : Fibres de bouleau jaune	32
Figure 3.2 : Granulés de HDPE.....	33
Figure 3.3 : MAPE	33
Figure 3.4 : Étape de fabrication des engrenages biocomposites.....	34
Figure 3.5 : Mélangeur discontinu à rouleaux Brabender Thermotron.....	35
Figure 3.6 : Morceaux de biocomposite solidifié	35
Figure 3.7 : Machine à granuler Grinder.....	36
Figure 3.8 : Granulés de biocomposites.....	36
Figure 3.9 : Thermopresse Dake	37

Figure 3.10 : Moule A283.....	37
Figure 3.11 : Engrenages en biocomposites.....	37
Figure 3.12 : Chargements sur une dent d'engrenage.....	38
Figure 3.13 : Applications des hypothèses de Lewis à une dent.....	39
Figure 3.14 : Dent d'engrenage considérée comme une poutre encastrée.....	42
Figure 3.15 : Réalisation du Mouchetis sur les dents d'engrenage.....	43
Figure 3.16 : Dispositif de montage des engrenages.....	44
Figure 3.17 : Camera CCD LaVision.....	45
Figure 3.18 : Cartographie des déplacements réels sur une dent à un instant t de l'essai.....	45
Figure 3.19 : Cartographie des déformations réelles à la racine d'une dent à un instant t de l'essai.....	46
Figure 3.20 : Étapes d'évolution de la résistance résiduelle.....	47
Figure 3.21: Disposition des caméras de type Arducam.....	48
Figure 3.22 : Machine de type MTS hydraulique.....	49
Figure 3.23 : Fonction de déplacement.....	49
Figure 4.1 : Courbes des forces-déplacements.....	52
Figure 4.2 : Raideur des engrenages biocomposites.....	53
Figure 4.3 : Cartographie des déplacements à la force maximale sur les biocomposites.....	53
Figure 4.4 : Courbes des forces – déformations.....	54
Figure 4.5 : Module de flexion des engrenages biocomposites.....	55
Figure 4.6 : Cartographie des déformations à la force maximale sur les biocomposites à la racine de la dent.....	55
Figure 4.7 : Durées de vies des engrenages biocomposites.....	58

Figure 4.8 : Mesures relatives selon deux indices d'endommagement pour un pour les engrenages non renforcés	61
Figure 4.9 : Mesures relatives selon deux indices d'endommagement pour les engrenages biocomposites renforcés de 20% de fibres de bouleau	62
Figure 4.10 : Mesures relatives selon deux indices d'endommagement pour les engrenages biocomposites renforcés de 30% de fibres de bouleau	64
Figure 4.11 : Comparaison des indices d'endommagement des biocomposites	66
Figure 4.12 : Comparaison des chemins de fissuration des biocomposites	66

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : Propriétés mécaniques des thermoplastiques courants.	11
Tableau 2.2 : Caractéristiques mécaniques des fibres végétales connues	13
Tableau 2.3 : Fractions massiques des constituants du bois selon le type d'arbre.....	14
Tableau 2.4 : Propriétés mécaniques du bouleau blanc et Jaune.	15
Tableau 2.5 : Propriétés mécaniques en traction des composites HDPE/Bouleau	19
Tableau 2.6 : Propriétés mécaniques en traction des composites PP/Bouleau	20
Tableau 2.7 : Propriétés mécaniques en traction des composites PP/Tremble	20
Tableau 2.8 : Propriétés mécaniques en flexion du composites HDPE/40%Bouleau	21
Tableau 3.1 : Propriétés géométriques des fibres de bouleau	32
Tableau 3.2 : Propriétés et mécaniques des fibres de bouleau.....	32
Tableau 3.3 : Propriétés mécaniques des éléments de la matrice	33
Tableau 4.1 : Résultats des déplacements et raideurs de la dent à la force maximale.....	52
Tableau 4.2 : Résultats des déformations et des modules de flexion des engrenages.....	54
Tableau 4.3 : Comparaison des résultats avec Mejri et al. [6] et de P. Blais et al [9]	56
Tableau 4.4 : Comparaison des résultats avec les Polyamides	56
Tableau 4.5 : Niveau de déplacement imposé par rapport déplacement max.....	57
Tableau 4.6 : Durées de vie moyennes à chaque niveau d'imposition de déplacements	58
Tableau 4.7 : Comparaison de résultats de durée de vie avec la littérature	59

Tableau 4.8 : Mesures moyennes relatives à l'initiation de la fissure des engrenages.....	61
Tableau 4.9 : Mesures moyennes relatives à l'initiation de la fissure pour les engrenages renforcés de 20% de fibres de bouleau	63
Tableau 4.10 : Mesures moyennes relatives à l'initiation de la fissure pour les engrenages renforcés de 30% de fibres de bouleau	64
Tableau 4.11 : Nombre de cycle moyen correspondant à l'apparition de la fissure	66

Liste des Abréviations

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrène

AC : Agent de couplage

AE : Acoustic Emission

AGMA : American Gear Manufacturers Association

CCD : Charge Coupled Device

CFN : Composite à Fibres Naturelles

CIPP : Centre Intégrée en Pâtes et en Papiers

CRML : Centre de Recherche des Matériaux Lignocellulosique

HDPE : Polyéthylène Haute Densité

MAPE : Polyéthylène Maléique

MTS : Material Testing Systems

PA : Polyamide

POM : Polyoxyméthylène

PP : Polypropylène

ISO : International Organization for Standardization

VDI : Verein Deutscher Ingenieure

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Mise en contexte

Le déclin de l'industrie papetière au Québec est un phénomène qui a évolué au cours des dernières décennies, influencé par plusieurs facteurs économiques, environnementaux et sociaux. L'industrie papetière a longtemps été l'un des piliers de l'économie québécoise mais elle a été confrontée à des défis importants qui ont contribué à son déclin. Parmi ces défis, on compte les changements dans la demande de papier traditionnel, notamment le papier journal. La demande de papier journal a considérablement diminué en raison de la montée en puissance des médias numériques, les gens lisent de moins en moins de journaux imprimés, ce qui a réduit la demande de papier journal [1] [2]. La production du papier journal représentait plus de 40% de production globale des industries papetières québécoises en 1999 [3] (figure 1.1).

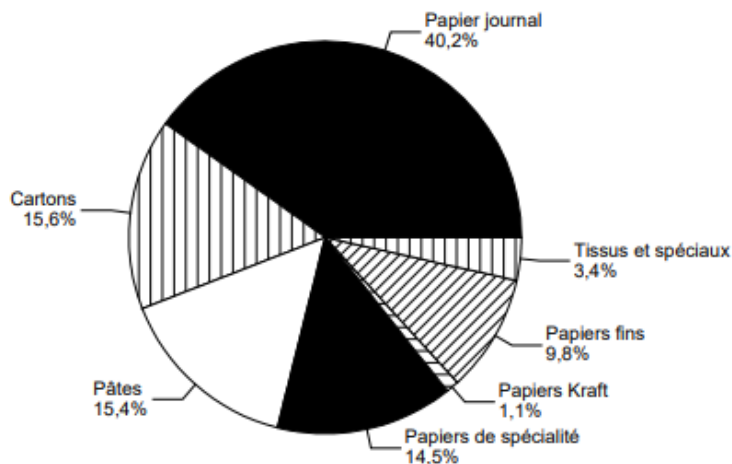


Figure 1.1: Produits fabriqués par l'industrie papetière au Québec en 1999 [3]

L'industrie papetière québécoise cherche donc de nouvelles approches pour renouveler l'intérêt des produits issus de matériaux lignocellulosiques qu'elle peut produire en quantité et à faible coût. Face à cela, les industriels s'intéressent depuis plusieurs années déjà à l'ajout des matériaux lignocellulosiques à des polymères thermoplastiques ordinaires comme le polyéthylène pour la fabrication des pièces non structurelles telles que des pots de fleurs, des bacs de poubelle, des ustensiles de cuisine, etc. (figure 1.2) ; ceci dans le but de valoriser les produits de matériaux lignocellulosiques, mais aussi de réduire l'usage des matières plastiques. Les inconvénients dus à l'usage intensif des matières plastiques ces dernières décennies ne sont plus à démontrer, ceux-ci constituent une problématique à l'échelle mondiale, tous les pays vivent cela en mal : la hausse du prix du pétrole par son épuisement, une forte pollution, une énergie grise et une empreinte carbone très élevée, sont engendrées par la fabrication, l'utilisation et la mise au rebut de ces plastiques.



Figure 1.2 : Quelques applications non structurelles des matériaux lignocellulosiques/polymères [4]

Les avancées de la recherche scientifique ont montré que ces nouveaux matériaux (matériaux lignocellulosiques/polymères) peuvent aussi être utilisés pour des applications structurelles car ces nouveaux matériaux montrent des résultats intéressants, autant en tension qu'en flexion, où le module élastique de ceux-ci se compare aux polymères techniques, tels que le nylon (PA6/PA66) [5], [6]. Ce dernier fait partie de la famille des plastiques techniques avec, entre autres, l'ABS, et ils sont régulièrement utilisés pour la fabrication des engrenages pour des utilisations à faible couple [7].

L'alternative proposée dans notre recherche consiste à renforcer des thermoplastiques ordinaires par des fibres courtes de bois, en particulier les fibres de bouleau très répandues au Québec notamment dans la région de la Mauricie. Dans ce contexte, l'étude et l'intégration des fibres naturelles dans la fabrication des éléments de transmission de puissance sont des actions en faveur de l'écoconception qui peuvent aider et encourager les industriels à intégrer ces matériaux dans la confection des pièces pour des applications structurelles. Les engrenages sont des composants qui sont standards, c'est-à-dire qu'il sera possible de les produire et de les vendre en format déjà établi par l'industrie sans attendre les spécifications de chaque client, et ce, indépendamment de la quantité vendue.

1.2 Problématique

Les composites thermoplastiques renforcés par des fibres naturelles courtes sont aujourd'hui une réalité dans l'industrie de la plasturgie. Les biocomposites offrent un bon rapport propriété/densité avec un faible coût et un impact environnemental limité. Mais, leurs utilisations restent limitées aux applications non structurelles. Il devient alors intéressant d'élargir l'utilisation en service des biocomposites pour des applications structurelles, telles que les éléments de transmission de puissance.

Afin d'améliorer les performances des engrenages en polyéthylène, le renforcement par des fibres naturelles courtes est de plus en plus couramment utilisé. Cela permet de réduire les coûts, d'augmenter la résistance du matériau par rapport aux polymères non renforcés, et offre un potentiel d'amélioration des performances des engrenages. Cependant, les polymères thermoplastiques renforcés par des fibres de bois sont sensibles à diverses influences extérieures telles que la chaleur, l'intensité et le type de chargement, l'humidité, etc. Dans le cas spécifique des engrenages, garantir un fonctionnement optimal du système de transmission nécessite une compréhension approfondie du comportement mécanique au niveau de la dent.

Notre groupe de recherche a consacré plus de dix ans à l'étude des aspects de la performance des engrenages en biocomposites [5], [6], [7], [8], [9]. En particulier, des efforts considérables ont été déployés pour examiner le comportement thermomécanique

et l'endommagement par fatigue des engrenages dans les conditions réelles de fonctionnement. Cependant, le lien entre les contraintes mesurées en flexion simple et les contraintes réellement engendrées lors de l'exploitation des engrenages demeure inconnu. Il est crucial de déterminer le comportement mécanique en statique et en fatigue des engrenages fabriqués à partir de biocomposites avec différents pourcentages de taux massiques de fibres. De plus, l'évaluation de la déformation d'une dent d'engrenage présente une problématique liée à la difficulté d'installer des jauges de déformations sur le flanc d'une dent. Dans ce mémoire, le comportement en statique d'une dent d'engrenage sera étudié en s'appuyant sur les mesures de champs de déplacements et de déformations par corrélation d'images. L'estimation du comportement et des propriétés mécaniques à l'échelle de la dent deviennent une tâche très importante à réaliser pour une utilisation optimisée de ces engrenages biocomposites de nouvelle génération.

1.3 Questions de recherches

- Quelle est l'influence du pourcentage de fibres sur le comportement mécanique en flexion en statique des engrenages en biocomposites ?
- Quelle est l'influence du pourcentage de fibres sur le comportement mécanique en flexion en fatigue des engrenages en biocomposites ?
- Quel pourcentage de fibres naturelles faut-il pour que la pièce composite ainsi élaborée puisse présenter les caractéristiques des matériaux d'ingénierie ?

1.4 Objectifs

Lors de leur utilisation, les dents d'engrenages sont soumises à d'importantes charges de flexion et de contact. L'objectif principal de cette recherche est d'étudier le comportement en flexion (en statique et en fatigue) d'une dent d'engrenage en biocomposites en s'appuyant sur les mesures de champs de déplacements et de déformations par corrélation d'images. Nous cherchons à établir une corrélation entre le comportement en flexion trois points et les essais rotatifs déjà étudiés par d'autres chercheurs [5] [7], comme illustré à la figure 1.3 ; Dans cette perspective, notre objectif

est d'analyser le comportement mécanique et l'endommagement lors de la flexion d'une seule dent d'engrenage. En isolant la dent soumise aux tests, les effets de l'usure et les variations thermiques résultant du frottement sont considérablement réduits.

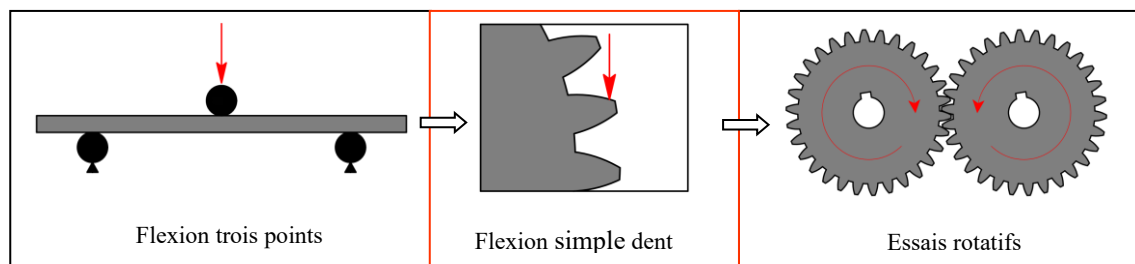


Figure 1.3: Évolution des échantillons utilisés et des types de tests établis. Adapté de [9]

Ce projet vise :

- La caractérisation du comportement mécanique en statique via des essais expérimentaux sur des dents d'engrenages en composites de thermoplastiques HDPE renforcés par des fibres naturelles de bouleau en se basant sur des mesures par corrélation d'images.
- La réalisation d'une étude expérimentale pour prédire la tenue en fatigue (de la flexion à la racine principalement) des engrenages, avec un montage conçu pour ce type d'essai.
- La vérification de l'effet du taux de fibres sur le comportement en statique et en fatigue
- La comparaison des résultats des essais analytiques et les essais expérimentaux pour établir le lien entre le comportement en flexion trois points (figure 1.3)

1.5 Structure du mémoire

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

La deuxième partie sera consacrée à la revue de la littérature ou recension des écrits sur les matériaux composites à fibres naturelles courtes, les engrenages en thermoplastiques et composites, et enfin sur le comportement en fatigue et les mécanismes d'endommagement des engrenages plastiques et biocomposite.

Dans la troisième partie, nous présenterons la méthodologie, les outils et les matériels utilisés pour réaliser les objectifs de cette recherche : la méthode de fabrication des différents échantillons, ainsi que les types de montage et plans des essais expérimentaux effectués.

La quatrième partie concerne la présentation des différents résultats d'essais obtenus, suivie par l'analyse et la discussion des résultats importants.

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

Chapitre 2 - Revue de la littérature

2.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, l'industrie papetière au Québec a connu un grand déclin, causé principalement par l'avenue des médias numériques, qui a occasionné une réduction importante dans la demande de papier journal [1], [2]. Ce secteur industriel cherche activement à susciter un regain d'intérêt pour les produits dérivés de matériaux lignocellulosiques, qui peuvent être produits en grande quantité et à moindre coût. C'est dans ce contexte que plusieurs chercheurs au Québec se sont concentrés sur l'incorporation de ces matériaux lignocellulosiques dans des polymères, avec pour objectif de développer des biocomposites comme une alternative aux matériaux plastiques, surtout pour des applications structurelles. Depuis les années 80, les avancées significatives ont été réalisées, notamment par le groupe de recherche de Kokta et al. [10] en 1983, Beshay et al. [11] en 1985, ainsi que Raj et al [12] en 1989, tous se penchant sur le potentiel d'ajout des fibres de tremble dans les composites à matrices thermoplastiques. Ces travaux ont contribué à l'évolution continue des connaissances sur ces nouveaux matériaux biocomposites. Les travaux plus récents [5], [6], [9], [13], [14], [15], [16] démontrent que les biocomposites offrent des perspectives prometteuses pour des applications structurelles.

Cette revue bibliographique se concentre sur l'application des composites à fibres naturelles courtes, en se focalisant spécifiquement sur son utilisation dans le contexte des engrenages. Plusieurs auteurs de notre groupe de recherche ont préalablement publié leurs travaux concernant l'application de ces biocomposites aux engrenages [7], [9], [13]. Dans cette revue de littérature, on s'attardera sur le mode d'endommagement par fatigue des engrenages dont fait l'objet ce mémoire de maîtrise.

Ce chapitre est structuré en trois sections principales : les matériaux composites à fibres naturelles courtes, les engrenages thermoplastiques et composites, et enfin les mécanismes et modes d'endommagement des engrenages plastiques et composites plus particulièrement le mode d'endommagement en fatigue des engrenages.

2.2 Matériaux pour les engrenages

L'évolution des matériaux utilisés pour les engrenages, depuis l'émergence des machines puissantes au 1er siècle, a été constante. Les engrenages sont fabriqués à partir d'une gamme variée de matériaux, tels que les métaux (acier, fonte, alliage d'aluminium), les thermoplastiques (plastiques techniques et plastiques de haute performance), les composites. Les recherches actuelles explorent les possibilités vers les matériaux biocomposites [5], [8], [9], [13]. Le choix du matériau des engrenages est crucial pour une utilisation sécuritaire dans les mécanismes; il doit répondre à divers critères tels que la charge, la vitesse, la température d'opération et les conditions environnementales. Les ingénieurs sélectionnent soigneusement le matériau en fonction des exigences spécifiques de chaque application, visant ainsi à assurer des performances optimales et une durée de vie prolongée des engrenages. Le focus dans cette revue sera mis spécifiquement sur les matériaux biocomposites à matrice thermoplastique, qui constituent le centre d'intérêt de notre recherche.

2.3 Composites à fibres naturelles

De façon générale, un matériau composite se définit comme l'assemblage de deux phases : le renfort (sous forme de fibres le plus souvent) et la matrice; cette dernière conserve la disposition géométrique des fibres et assure, par les interfaces, le transfert de charge entre elle. La matrice (le liant en d'autres termes) peut appartenir à la famille des polymères, des métaux ou des céramiques. Sous les mots « fibres naturelles » se trouvent des fibres organiques, d'origine végétale (cellulosique), animale (protéinique), et des fibres minérales telles que l'amiante [17].

L'utilisation de fibres naturelles comme renfort de matériaux composites se justifie par la nécessité : de développer des matériaux et des technologies permettant de réduire les impacts sur l'environnement; d'utiliser des ressources renouvelables; de valoriser les ressources locales disponibles dans les pays.

Dans les composites, on considère généralement que les fibres sont courtes lorsque leur longueur se situe entre quelques centaines de micromètres et quelques millimètres. Généralement, cela signifie des longueurs inférieures à 1 cm [18]. Les matériaux composites à fibres naturelles courtes sont généralement composés de polymères thermoplastiques auxquels on associe très souvent à faible teneur un agent de couplage dont le rôle est de consolider l'interface matrices/fibres. Cette composition de ces matériaux composites va contribuer à obtenir un matériau aux propriétés mécaniques plus avantageuses que celles du polymère thermoplastique seul [17], [19].

2.3.1 Matrice thermoplastique

Les thermoplastiques font partie avec les élastomères et les thermodurcissables de la grande famille des plastiques. Les plastiques sont essentiellement des polymères formés par la répétition potentiellement infinie de petites unités moléculaires appelées monomères. Les fameux plastiques classiques sont obtenus par des procédés chimiques synthétiques à base de sources pétrochimiques. De plus on retrouve aussi des plastiques naturels appelés les bioplastiques [20].

La particularité des thermoplastiques est que, ce sont les plastiques capables de se ramollir (parfois on observe une fusion franche) lorsqu'ils sont chauffés suffisamment, mais qui, se refroidissant, redeviennent durs. Les thermoplastiques conservent donc de manière réversible leur thermoélasticité initiale ; cette qualité rend donc cette famille de matière plastique facilement recyclable [20], [21].

Selon les exigences d'usage, les thermoplastiques sont classés en trois grandes catégories et ont des prix différents sur le marché comme le montre la figure 2.1

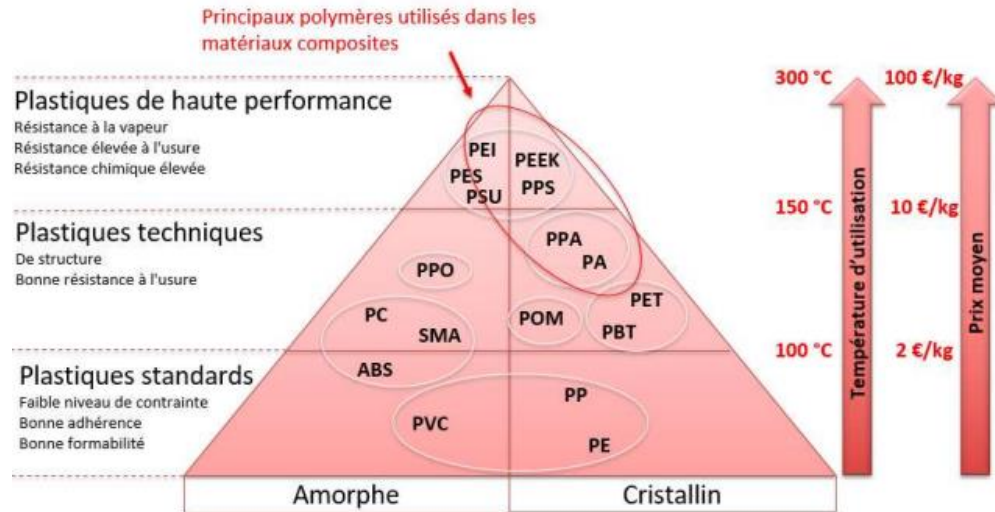


Figure 2.1: Classification des thermoplastiques [10]

Les thermoplastiques ordinaires ou standards sont des plastiques à faible propriété thermomécanique, facile à transformer, ils sont les plus utilisés au vu des faibles coûts pour la fabrication des objets comme les emballages.

Les thermoplastiques techniques sont des plastiques ayant des propriétés thermomécaniques beaucoup plus intéressantes comparativement au thermoplastique ordinaire mais sont beaucoup plus coûteux. Les thermoplastiques techniques ayant une structure moléculaire cristalline comme le POM (acétal) sont beaucoup utilisés en remplacement du métal dans plusieurs applications en ingénierie.

Les thermoplastiques hautes performances sont une classe de polymères qui diffère des plastiques standards et des plastiques techniques, principalement par leur température et leur stabilité chimique, leurs propriétés mécaniques, mais aussi par les quantités produites et leurs prix. Ils sont utilisés pour les technologies de pointes comme l'aéronautique, l'automobile.

Tableau 2.1 : Propriétés mécaniques des thermoplastiques courants. Adapté de [14]

Thermoplastiques courants	Module d'Young (<i>GPa</i>)	Limite élastique (<i>MPa</i>)	Resistance à la traction (<i>MPa</i>)
Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	2.4	41	44
Polyoxyméthylène (acétal, POM)	2.9	59	-
Polyamides (Nylon, PA)	1.4	50	55
Polycarbonate (PC)	2.4	62	67
Polyether ether ketone (PEEK)	3.8	79	85
Polyéthylène (PE)	0.75	23	30
Polypropylène (PP)	1.2	28	-

2.3.2 Fibres naturelles

La famille des fibres naturelles peut être classée en trois catégories selon leurs origines : les fibres animales, les fibres végétales et les fibres minérales (figure 2.2). Le choix d'une fibre plutôt qu'une autre peut être motivé par les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des fibres. Mais, la disponibilité d'une fibre locale qui présente des propriétés intéressantes peut être considérée comme un facteur déterminant pour le choix d'une fibre. Toutefois, seules quelques-unes démontrent des propriétés mécaniques intéressantes justifiant leur utilisation en tant que renforts pour les matériaux composites.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons particulièrement aux fibres végétales et plus spécifiquement aux fibres de bois.

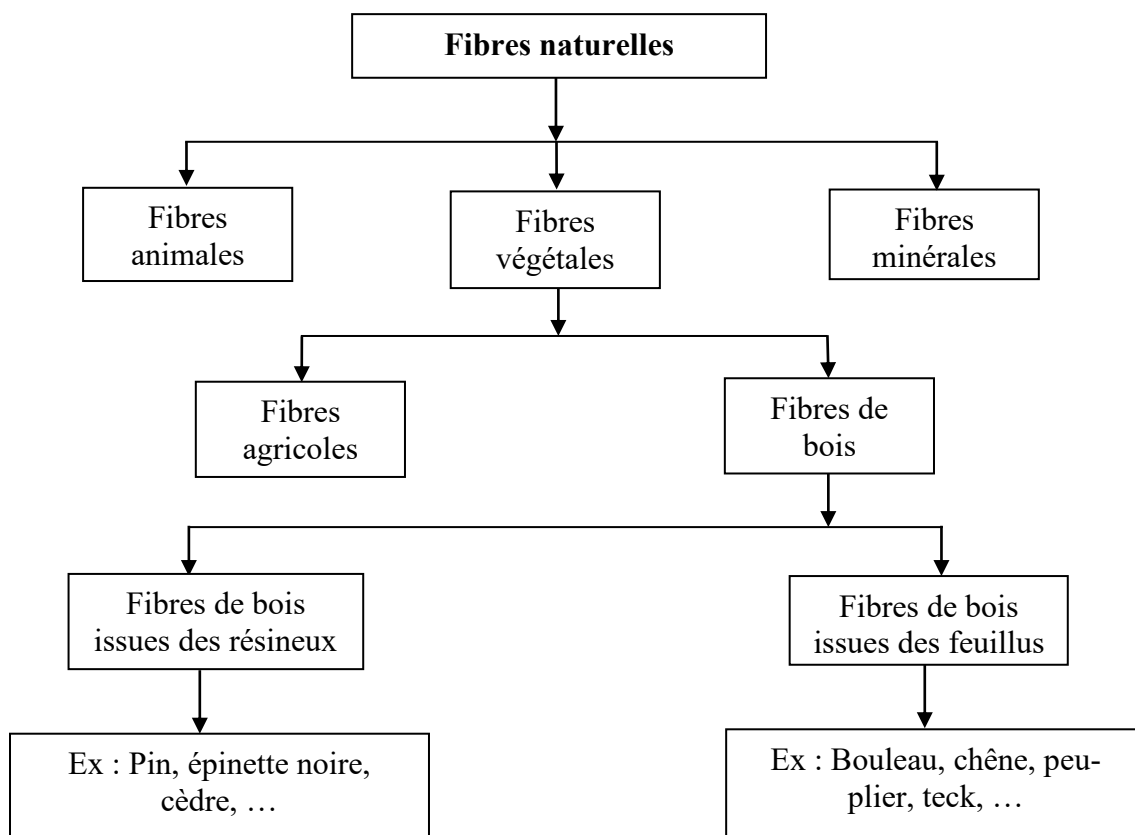


Figure 2.2 : Classification des fibres naturelles. Adapté de [22]

- **Fibres végétales**

Les fibres végétales présentent une résistance par unité de poids comparable à celle des fibres synthétiques. Bien que leur utilisation soit actuellement restreinte à quelques produits composites, les avantages inhérents aux fibres végétales, associés à leurs diverses propriétés naturelles, suggèrent que ces fibres pourraient jouer un rôle plus prépondérant dans la composition de composites plus économiques à l'avenir [23]. Les fibres végétales sont couramment exploitées dans le cadre de la recherche scientifique en raison de leurs propriétés mécaniques bien adaptées. Ces fibres peuvent être désignées

par divers noms selon leur origine [6]. Le tableau 2.2 présente les caractéristiques géométriques et mécaniques des fibres végétales les plus connues.

Tableau 2.2 : Caractéristiques mécaniques des fibres végétales connues [18], [24]

Fibres végétales	Longueur (mm)	Diamètre (μm)	Densité (g/m^3)	Module de Young (GPa)	Déformation maximales (%)
Bois	-	-	0.3 - 1.1	8 - 15	
Coton	25	12 - 25	1.5 - 1.6	6 - 10	6 - 8
Lin	4 – 8.5	12 - 30	1.54	50 - 70	1.3 – 3.3
Chanvre	5 - 40	16 - 50	1.45 - 1.55	30 - 60	1.7 – 2.7
Jute	2.5	5 - 25	1.44	20 - 55	1.5 - 2
Sisal	100 - 125	100 - 400	1.45	9 - 22	3 - 14
Abaca	60 et plus	50 - 280	-	-	2.1 – 2.4

- **Fibres de bois**

Le bois, provenant des arbres de la végétation, présente une hétérogénéité due aux variations naturelles significatives entre les diverses espèces d'arbres. En tant que matière lignocellulosique, le bois est composé à la fois de composants principaux tels que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, ainsi que de composants mineurs incluant des cendres et des matières extractibles [18].

Il existe deux catégories principales d'arbres : les feuillus et les résineux, comme illustré dans le tableau 2.3. Les arbres feuillus, comme leur nom l'indique, sont reconnaissables par la présence de feuilles, tandis que les résineux sont dotés d'aiguilles. Cette distinction macroscopique facilite l'identification des arbres dans la nature, mais d'autres caractéristiques internes permettent également de les différencier. Une méthode supplémentaire pour distinguer les arbres repose sur la longueur et l'épaisseur de leurs

fibres. Les fibres des arbres résineux se distinguent par leur longueur et leur épaisseur supérieures à celles des arbres feuillus [25].

Tableau 2.3 : Fractions massiques des constituants du bois selon le type d'arbre [26]

Biomasse	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Résineux	40 – 55 %	10 -15 %	25 – 30 %
Feuillus	40 – 50 %	20 – 30 %	15 – 30 %

Dans l'industrie papetière, seule la partie du tronc de l'arbre est exclusivement exploitée. Les branches et les racines contiennent trop d'éléments nuisibles au processus de fabrication du papier. Ainsi, le tronc demeure la seule partie de l'arbre récupérée pour la production de papier. Tout comme pour l'arbre, l'ensemble des parties du tronc ne peut être utilisé. La Figure 2.3 illustre les diverses composantes du tronc. Les couches extérieures du tronc, telles que l'écorce, qui assure la protection de l'arbre, et le liber, responsable du transport de la sève élaborée et de la formation des fibres, revêtent une importance cruciale pour la vie de l'arbre mais sont indésirables dans les procédés de transformation en pâte. Par conséquent, elles nécessitent une élimination lors de la fabrication du papier. En définitive, du tronc d'arbre, seules trois parties, à savoir le cambium, l'aubier et le duramen, sont préservées pour le processus de fabrication de la pâte.

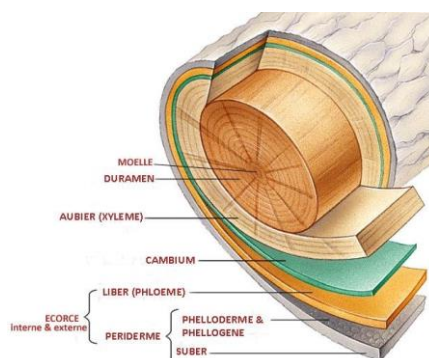


Figure 2.3 : Différentes couches constitutives d'un tronc d'arbre [27]

- **Fibre de bouleau**

Le bouleau (*Betula*) représente un genre d'arbres et d'arbustes appartenant à la famille des *Betulaceae*. Il englobe environ cinquante espèces réparties dans l'Arctique et la zone tempérée de l'hémisphère Nord. Au Canada, le bouleau est largement répandu à travers le pays. Les bouleaux se distinguent par leur écorce fine qui se détache en feuillets. Leur feuille, de forme ovale ou triangulaire, se caractérise par des nervures rectilignes et un contour bidenté [28]



Figure 2.4 : Arbre de bouleau [28]

Le tableau 2.4 offre une analyse approfondie des propriétés mécaniques du bois de bouleau en Amérique du Nord, basée sur des études antérieures de Jessome, 1977 [29] et Ross, 2010 [30]. Les valeurs présentées sont issues d'éprouvettes sans défauts extraites du bois de cœur, fournissant une indication des caractéristiques mécanique du bouleau

Tableau 2.4 : : Propriétés mécaniques du bouleau blanc et Jaune. Adapté de [31]

Propriétés mécaniques	Bouleau Blanc	Bouleau Jaune
Masse volumique anhydre (Kg/m^3)	571	608
<i>Flexion statique</i>		
Module d'élasticité (GPa)	12.9	14.1
Resistance à la rupture	94.8	106.2
<i>Compression parallèle</i>		
Module d'élasticité (GPa)	13.4	15.2
Contrainte maximale (GPa)	44.7	52.1
Energie de déformation (kJ/m^3)	1.43	1.58

2.4 Travaux récents consultés et résultats pertinents sur les composites à fibres naturelles

Plusieurs recherches publiées dans la littérature se sont penchées sur les composites à fibres naturelles, notamment ceux contenant des fibres de bois courtes. Les procédés de fabrication prédominants pour les échantillons sont principalement l'injection ou le moulage par thermocompression. La matrice thermoplastique la plus fréquemment utilisée est le polyéthylène (PE) ou le polypropylène (PP). Les chercheurs ont réalisé des analyses des propriétés mécaniques en quasi statique, ainsi que des études sur les propriétés thermiques et physiques de ces matériaux, comme détaillé dans différentes références [5], [7], [8], [32], [33], [34], [35], [36]. Ces études se concentrent particulièrement sur la variation du taux de fibres et d'agent de couplage afin d'évaluer leur influence sur le comportement du matériau en traction et/ou en flexion. Plus récemment, les travaux de recherche se sont orientés vers l'optimisation de ces biocomposites thermoplastiques/fibres naturelles à travers des études de fatigue, les analyses d'impact, des comparaisons, des investigations sur l'influence des rayons UV ainsi que des études sur l'effet des attaques fongiques sur les fibres naturelles.

Sam-Jung Kim et al [37] réalisent une comparaison des propriétés mécaniques, en particulier la résistance à la traction et à la flexion, entre les composites polypropylène/fibre de coton et polypropylène/fibre de bois. Ils examinent également l'impact de l'indice de fusion du polypropylène (PP) sur les propriétés mécaniques des composites. Les résultats démontrent que la résistance à la traction des composites PP/fibres de bois décroît avec l'augmentation de la proportion massique des fibres de bois, tandis que celle des composites PP/fibre de coton présente un comportement différent : l'ajout de 10% en poids de fibre de coton diminue la résistance à la traction, mais l'ajout de 20% et 30% en poids de fibre de coton la fait augmenter en raison de l'enchevêtrement des fibres de coton. Les chercheurs soulignent également que, pour les composites PP/fibres de bois, l'indice d'écoulement à chaud (IM) du PP joue un rôle essentiel dans la régulation des propriétés mécaniques (résistance à la traction et à la flexion). Ils concluent que, pour les composites PP/fibres de bois, le PP avec un IM plus

élevé constitue un choix optimal pour améliorer la résistance à la flexion. En ce qui concerne les composites PP/fibres de coton, le PP H360F est le choix optimal pour améliorer la résistance à la flexion.

Martin Yemele et al [38] se penchent sur l'influence de la teneur en fibres et de la taille de l'écorce sur les propriétés mécaniques des composites écorces/HDPE fabriqués par extrusion. Ils comparent ces composites avec des composites bois/HDPE, en utilisant des fibres d'écorce d'épinette noire et de peuplier faux-tremble de différentes tailles (fine, moyenne et grossière) et de teneurs de 50% et 60% en pourcentage massique. À travers des essais de traction et de flexion, ils démontrent que les effets des espèces et des proportions massiques sont significatifs. Les propriétés mécaniques des composites issus de l'épinette noire et de l'écorce de peuplier faux-tremble présentent des comportements de contrainte et de déformation différents. L'augmentation de la proportion de fibres a entraîné une diminution de toutes les propriétés mécaniques, à l'exception du module d'élasticité en traction et en flexion. Ils démontrent également que l'effet de la longueur des fibres n'est pas aussi important que celui de l'espèce ou de la proportion d'écorce. L'augmentation de la longueur des fibres améliore généralement la résistance et l'élasticité, mais diminue la ténacité. Les chercheurs concluent que la plupart des propriétés mécaniques étudiées sont inférieures pour les composites écorces/HDPE par rapport aux composites bois/HDPE. La résistance à la traction et les déformations à la rupture sont systématiquement plus élevées pour les composites écorces-plastiques.

Khaled Nasri et al [39] examinent l'impact de l'irradiation UV sur les propriétés mécaniques et les performances d'impact en fonction de la chute des biocomposites de polypropylène renforcés par des fibres de lin et de pin, fabriqués par injection. À travers des essais de flexion trois points et des essais d'impact de chutes et de poids, ils démontrent que sous l'irradiation UV, les propriétés de ces deux biocomposites ont subi une dégradation. Le polypropylène renforcé avec les fibres de lin présente un taux de dégradation des propriétés mécaniques en flexion (rigidité, résistance mécanique et déformation à la rupture) relativement plus faible par rapport au polypropylène renforcé

par les fibres de pin, ils expliquent ce phénomène par le nombre et la taille des fissures de surfaces sur les échantillons composites, qui sont considérablement plus important pour les composites PP/Pin après vieillissement. Les chercheurs observent une dégradation similaire des propriétés lors des essais d'impact et en concluent que l'irradiation UV et les mécanismes d'endommagement dépendent fortement de la nature matériaux.

Kodjovi Agbozouhoue et al [14] étudient l'influence de l'environnement extérieur sur propriétés chimiques et mécaniques des composites polyéthylène/fibres de bouleau jaune fabriqués par injection. Ils exposent des échantillons traités chimiquement et non traités, à des champignons responsables de la pourriture fongique. Les fibres de bouleau sont préalablement traitées avec une solution de ZnO-NaOH avant la fabrication des composites. À travers des essais de traction et d'impact d'izod, ils démontrent que le NaOH a altéré les fibres, entraînant une diminution des propriétés mécaniques (module d'Young et énergie d'impact) des composites. Les échantillons contenant 20% de fibres traitées au ZnO et non exposées à la pourriture fongique présentent un module d'Young de 2.67 ± 0.13 GPa, tandis que les échantillons contenant 20% de fibres traitées au ZnO non exposées à la décomposition fongique présentent un module d'Young de 1.42 ± 0.05 GPa, représentant ainsi une diminution de 53%. Les chercheurs concluent que le ZnO est efficace pour le traitement des fibres et recommandent son utilisation sous forme de nanoparticules pour ne pas compromettre les performances du composite.

Agbelenko Koffi et al [16] examinent les propriétés mécaniques des composites HDPE vierges/fibre de bouleau fabriqués par injection; à travers les tests de résiliences (tests d'impact Izod et des tests d'impact par chute), ils évaluent l'impact du poids de chute, la résistance aux chocs Izod et la dureté. Ils montrent que l'énergie d'impact absorbée par le poids de chute est restée constante et indépendante de la teneur en fibres, tandis que la résistance aux chocs présente une relation inversement proportionnelle à la teneur en fibres ; La ténacité du matériau a montré une légère diminution à 40% de fibres, la

dureté Shore D du HDPE vierge (0% de fibre) est passé de 50,6 à 74.6 à 30% de fibres. Ils évaluent également au travers des essais de traction, la résistance à la traction, ainsi que le module d'élasticité du matériau; ils montrent une nette amélioration du module d'élasticité et de la résistance à la traction pour les composite contenant 40% de fibres. De plus ces propriétés en traction représentent respectivement une amélioration de 27.2% et 19.7% à celles rapportées pour un matériaux similaire fabriqué par compression. Les chercheurs concluent que le HDPE renforcé par des fibres de bouleau pourrait constituer une alternative aux polymères techniques largement utilisé dans le secteur industriel.

Tableau 2.5 : Propriétés mécaniques en traction des composites HDPE/Bouleau [16]

Composite	Module d'Young (MPa)	Resistance à la traction (MPa)	Déformation maximale (%)
HDPE vierge	15010 (\pm 0130)	18.8 (\pm 1.64)	-
HDPE/10% Bouleau	1660 (\pm 90)	25.08 (\pm 0.11)	-
HDPE/20% Bouleau	2670 (\pm 130)	32.47 (\pm 0.19)	12.74 (\pm 1.08)
HDPE/30% Bouleau	3370 (\pm 160)	38.33 (\pm 0.47)	7.60 (\pm 0.4)
HDPE/40% Bouleau	4390 (\pm 140)	45.54 (\pm 1.024)	3.19 (\pm 0.46)

Alencar Bravo et al, [34] comparent le comportement mécanique de composites verts et biocomposites fabriqués par thermocompression et basés sur une matrice HDPE avec les fibres de bouleau. À travers les essais de traction monotones, cycliques et de fluage ils évaluent les propriétés mécaniques des matériaux. De plus, grâce aux essais d'émission acoustique (AE), ils examinent l'évolution et les mécanismes d'endommagement des échantillons. Ils montrent que l'ajout de couplage AC réduit considérablement le rapport entre les dommages causés par l'AE et les dommages mécaniques. Les chercheurs concluent que l'agent de couplage a un effet extrêmement bénéfique sur les composites verts.

Faycal Mijiyawa et al, [5] comparent les fibres de bouleau et de tremble dans une matrice de polypropylène PP avec et sans agent de couplage fabriqués par thermocompression. À travers les essais de traction, ils examinent les propriétés mécaniques des composites (module d'élasticité et résistance à la traction), ils montrent que : En l'absence de l'agent de couple, le module d'élasticité du PP/bouleau et du PP/tremble augmente respectivement de 69% pour une concentration de fibres variant de 0 et 40% en poids. De plus, la résistance à la traction des composites renforcés par les fibres de 0 à 40% en poids augmente de 66% pour le PP/bouleau et de 51% pour le PP/tremble. Les chercheurs en concluent que les composites PP/bouleau ont une meilleure résistance que les autres composites étudiés, l'adhérence entre les fibres et le PP est nettement meilleure en utilisant des fibres de bouleau.

Tableau 2.6 : Propriétés mécaniques en traction des composites PP/Bouleau [5]

Composite PP/Bouleau	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
PP vierge	2.15 (±1.64)	13.63 (±2.16)
PP/20% Bouleau	2.27 (±0.12)	15.90 (±0.99)
PP/20% Bouleau/3% MAPE	2.58 (±0.12)	22.51 (±0.75)
PP/30% Bouleau	2.81 (±0.37)	18.84 (±2.14)
PP/30% Bouleau/3% MAPE	3.05 (±0.33)	29.21 (±2.33)
PP/40% Bouleau	3.65 (±0.23)	22.61 (±2.63)
PP/40% Bouleau/3% MAPE	3.76 (±0.18)	30.82 (±2.37)

Tableau 2.7 : Propriétés mécaniques en traction des composites PP/Tremble [5]

Composite PP/Tremble	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
PP vierge	2.15 (±1.64)	13.63 (±2.16)
PP/20% Tremble	2.20 (±0.09)	17.56 (±0.47)
PP/20% Tremble/3% MAPE	2.59 (±0.07)	22.79 (±2.76)
PP/30% Tremble	3.00 (±0.28)	19.30 (±2.79)
PP/30% Tremble/3% MAPE	3.23 (±0.19)	24.99 (±1.23)
PP/40% Tremble	3.52 (±0.30)	20.60 (±2.70)
PP/40% Tremble/3% MAPE	4.05 (±0.13)	28.26 (±3.44)

Mejri et al, [6] étudient le comportement mécanique en fatigue des composites polyéthylène renforcé par des fibres de bouleau fabriqué par thermocompression. Le comportement en fatigue des biocomposites est examiné en termes de durabilité et d'endommagement : la durabilité est évaluée avec deux fréquences de charge (10 Hz et 15 Hz), ils utilisent trois indices pour caractériser l'endommagement notamment la mesure de la propagation de la fissure, la mesure de la contrainte résiduelle et par émission acoustique. À travers les essais de fatigue en flexion et en flexion monotones en 3 points, ils montrent que les propriétés élastiques du biocomposite se comparent avec des thermoplastiques techniques comme le Nylon 66 et le Nylon 11, le biocomposite renforcé de 40% de fibre de bouleau présente une résistance à la flexion supérieure à celle du nylon 11. Ils montrent également que la durée de vie en fatigue des biocomposites dépasse 5×10^6 cycles, pour des niveaux de déformation compris entre 0.39% et 0.91%. Cette observation est la même pour les deux fréquences de chargement utilisés. Les chercheurs concluent que, quelle que soit la fréquence appliquée, la résistance à la fatigue à cycle élevé est toujours atteinte à un niveau de déformation de 0.91%.

Tableau 2.8 : Propriétés mécaniques en flexion du composites HDPE/40%Bouleau [6]

Matériau	Module d'Young (GPa)	Contrainte maximale (MPa)	Déformation a la rupture (%)
Composite HDPE/40%Bouleau	2.54 (± 0.15)	56.19 (± 2.16)	6.20 (± 0.51)

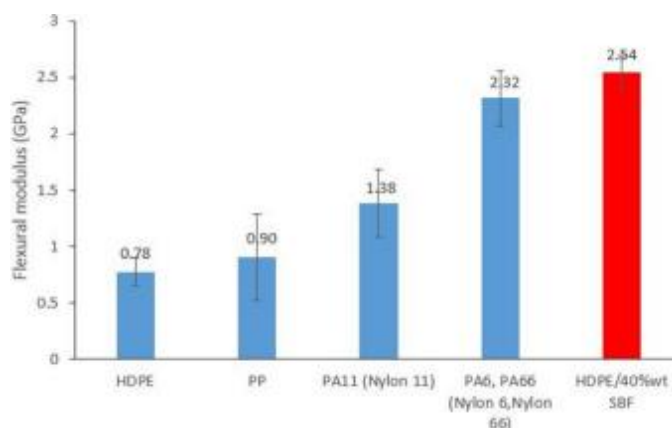


Figure 2.5 : Comparaison des modules de flexion du composites HDPE/40%Bouleau avec des thermoplastiques usuels [6]

2.5 Modes d'endommagement des engrenages plastiques et biocomposites

De façon générale, l'endommagement d'un matériau est défini comme étant la détérioration progressive et irréversible due à l'apparition des discontinuités à l'échelle microscopique (microfissurations, microvides, etc.). L'endommagement se traduit par un ensemble de changements microstructuraux occasionnant une variation des propriétés mécaniques globales à l'échelle macroscopique. Dans le cas des engrenages en matériau plastique, lors de leur mise en service, les dents d'engrenages en matériau plastique peuvent subir principalement quatre modes d'endommagement comme le montre la figure 2.6.

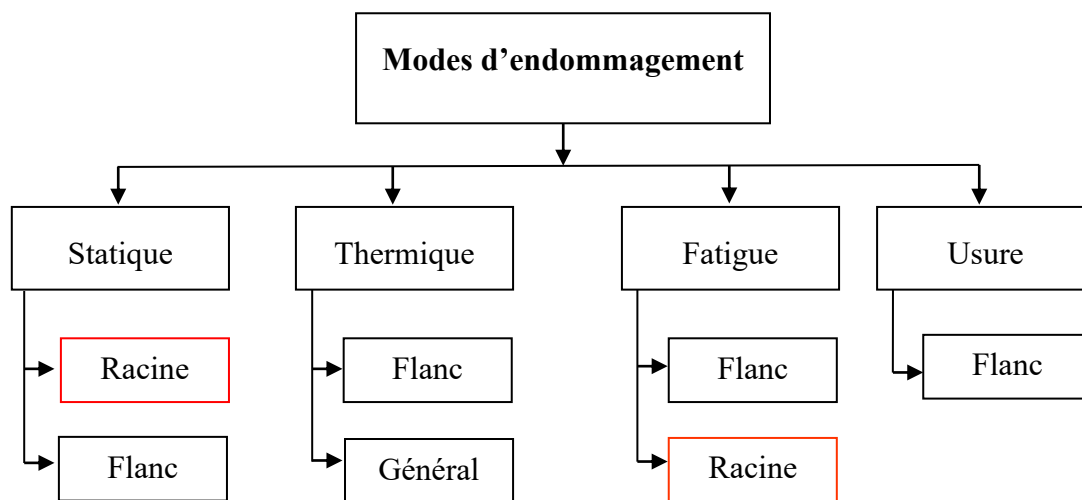


Figure 2.6 : Modes d'endommagement des engrenages [8]

Alencar Bravo et al [8] mettent en évidence l'importance de la simulation pour comprendre le comportement et l'endommagement des engrenages en plastique. Le modèle développé par les chercheurs, prend en compte la complexité de l'engrenage, les propriétés du matériau permettant de prédire avec précision le comportement des engrenages plastiques. La répartition de la charge entre plusieurs paires de dents, influencée par le degré d'extension du contact réel, joue un rôle crucial dans la réduction

des contraintes et de la chaleur de frottement. L'analyse par éléments finis révèle que la charge normale sur la dent impacte les modes d'endommagement (figure 2.7)

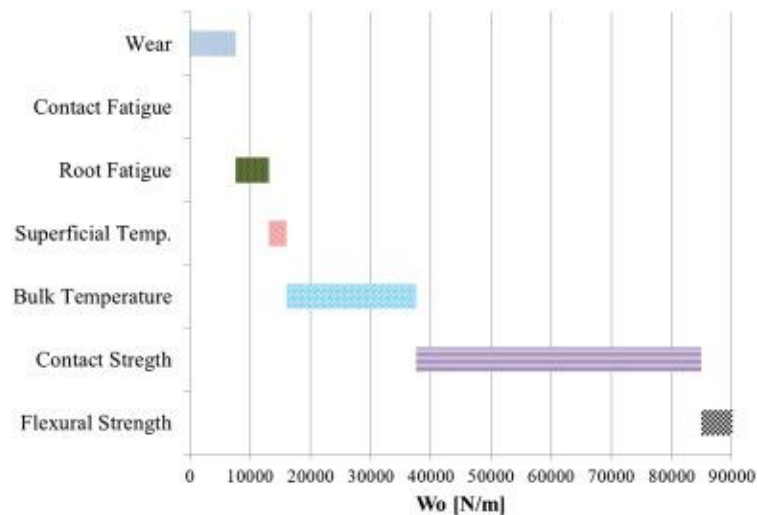


Figure 2.7 : Modes d'endommagement en fonction de la charge [8]

a) Endommagement en statique

Le mode d'endommagement en statique est directement lié à la contrainte à la rupture du matériau (calculé ou adapté à l'échelle de la pièce). L'endommagement survient lorsque les contraintes sur l'engrenage sont supérieures à la limite du matériau de l'engrenage, entraînant des déformations plastiques permanentes jusqu'à la rupture. Les contraintes sur les engrenages peuvent être classées en deux groupes : les contraintes de flexion au pied de la dent et en surface [8]. Ces contraintes sont importantes pour déterminer le facteur de sécurité et évaluer le comportement en fatigue.

b) Endommagement thermique

La rupture thermique est l'un des principaux modes d'endommagement des engrenages plastiques. Les sources d'échauffement des engrenages proviennent : de l'échauffement dû au frottement, de l'échauffement résultant du piégeage de l'air et de l'échauffement viscoélastique interne du matériau [18]. Le mode d'endommagement

thermique se manifeste, soit par une rupture thermique généralisée, ce qui implique un ramollissement de la dent entière dû à la perte des propriétés mécaniques du matériau sous l'effet de l'hystérésis thermique et du frottement; soit par une rupture thermique de surface ce qui implique un ramollissement localisé du profil de la dent à la suite d'une chaleur excessive, entraînant la fusion du matériau, des déchirures du matériau et une détérioration du profil [8], [18]. Demagna Koffi et al [40], comparent différentes configurations de trous de refroidissement pour les engrenages plastiques et proposent de nouveaux motifs de trous de refroidissement qui prend en compte les aspects spécifiques de l'engrenage plastique (les engrenages en plastique impliquent une extension du contact entre les dents en dehors de la ligne d'action). L'objectif dans cette étude était de déterminer les méthodes les plus efficaces pour atténuer les dommages thermiques à travers les trous de refroidissement. À travers une analyse par des méthodes numériques, ils montrent un compromis optimal entre la réduction de la température et les propriétés mécaniques de la nouvelle géométrie des dents. Les chercheurs en concluent que des simples variations dans les motifs de trous de refroidissement proposés améliorent les performances des dents.

c) Endommagement par usure

L'usure se caractérise par un enlèvement de matière à la surface de la dent dû par la combinaison de la force appliquée et de la vitesse de glissement relative. En plus de la perte directe de matière, qui conduit à une défaillance fonctionnelle, l'usure de surface amène le système d'engrenages à modifier considérablement ses caractéristiques de vibration et de bruit. La surface d'usure affecte les modèles de contact des engrenages de telle sorte que les contraintes de contact et la répartition des charges sont modifiées pour accélérer l'apparition d'autres modes de défaillance [8].

d) Endommagement en fatigue

L'endommagement par fatigue de la dent survient du fait que les dents d'engrenage subissent tour à tour la charge d'une puissance transmise, leur état de contrainte varie de façon cyclique, ceci occasionne leur défaillance en fatigue à un niveau de chargement bien au-dessous de la limite d'élasticité du matériau [8], [21]. En particulier, Les deux principaux risques de défaillance des engrenages plastiques sont : par rupture en pied de dent ou par pression sur le flanc. Plus particulièrement, la rupture des engrenages résulte fréquemment d'une propagation de fissures à la racine de la dent, rupture engendrée par la fatigue en flexion de celle-ci.

Zehua Lu et al, [41] apportent des contributions majeures, notamment une relation de conversion entre les contraintes thermiques et une méthode d'essai de fatigue accélérée pour les engrenages polymères. Cette approche permet la prédiction de la durée de vie et la compilation du spectre de charge de charge des engrenages en polymère. A titre d'exemple avec le POM, un modèle de simulation de fatigue de contact a été développé, tenant compte de l'effet de la température, souvent négligé dans les engrenages métalliques. Les résultats de ces études incluent le développement d'une équation de conversion température-durée de vie équivalente, et la validation de la méthode par des essais de durée de vie et une proposition d'essai accéléré réduisant la durée du test de 45%.

Alencar Bravo et al. [7] étudient la faisabilité de remplacement des engrenages plastiques par des engrenages écologiques (HDPE/bouleau), ils comparent les performances ces engrenages écologiques en termes de fatigue et de température de fonctionnement avec des matériaux plastiques classiques utilisés dans les applications similaires. Les engrenages biocomposites semi-écologique et les engrenages composites entièrement écologiques présentent des comportements similaires en termes de température de fonctionnement, mais sont moins sensibles à l'augmentation de la température. En ce qui concerne la fatigue, les engrenages écologiques se comportent de manière comparable aux engrenages en nylon. Dans la plupart des cas d'engrenages testés dans cette étude, une température d'équilibre plus basse était significative d'une durée de vie plus longue.

Damijan Zorko et al. [42] présentent les polyamide 6.10 biosourcés comme alternative au polyoxyméthylène (POM) et du polyamide 66 (PA66) d'origine fossile pour la fabrication des engrenages en polymères. À travers des essais rotatifs jusqu'à défaillance de l'engrenage à des couples de 0.8 N.m, 1.0 N.m et 1.2 N.m et à une vitesse de rotation de 1400 tr/min. Ils montrent que les engrenages en PA 6.10 présentent la plus longue durée de vie dans des conditions d'essais identiques et comparés aux engrenages en POM et en PA 66, leur durée de vie moyenne était respectivement 3.5 et 10 fois plus longue. Les chercheurs en concluent que le PA 6.10, en tant que matériau biosourcé surpasse les matériaux fossiles couramment utilisés dans les transmissions à engrenages, présentant une résistance à la fatigue plus élevée et un coefficient de frottement inférieur. Bien que le type de défaillance prédominant ait été la fatigue à la racine.

2.6 Approche de modélisation de l'endommagement par fatigue

Le développement de modèles d'endommagement par fatigue implique deux étapes principales : l'identification des mécanismes d'endommagement et la formulation de la cinétique d'endommagement. Ces modèles sont généralement classés en familles ou approches distinctes dans la littérature.

L'approche phénoménologique de l'endommagement par fatigue se concentre sur la dégradation des propriétés mécaniques macroscopiques, telles que la rigidité et la résistance, en utilisant une variable phénoménologique appelée « d » pour caractériser cette perte sans nécessairement la relier à des mécanismes d'endommagement spécifiques. En revanche, l'approche basée sur la résistance résiduelle décrit la variation de la résistance résiduelle en fonction du nombre de cycles, supposant que celle-ci est liée à la contrainte de rupture statique. De même, l'approche basée sur la rigidité résiduelle décrit la dégradation du module d'élasticité du matériau sous chargement de fatigue, en utilisant la variable d'endommagement « d » et exprime généralement la croissance de l'endommagement en fonction du nombre de cycles [21], [43].

L'approche micromécanique se base sur les observations des mécanismes d'endommagement et les mesures locales à l'échelle microstructurale. Elle utilise la

méthode d'homogénéisation sur un volume élémentaire représentatif pour obtenir le comportement global du matériau endommagé.

L'approche progressive, également appelée modèle d'endommagement progressif, utilise une ou plusieurs variables d'endommagement directement liées aux mécanismes d'endommagement, tels que les microfissures matricielles et la rupture des fibres.

Ces différentes approches offrent des outils pour modéliser et comprendre l'endommagement par fatigue dans divers matériaux, chacune avec ses avantages et ses limitations.

2.7 Fatigue à la racine de la dent

La fatigue à la racine de la dent est un mode d'endommagement critique qui se produit à des charges relativement basses. Cependant, seule l'usure et les dommages de contact sont considérés comme critiques à des charges encore plus faibles que la fatigue à la racine de la dent [44]. La rupture des engrenages résulte généralement d'une propagation des fissures à la racine de la dent causée par la fatigue en flexion. Ce mode d'endommagement est important bien que moins fréquent dans les engrenages en plastique et en plastique-composite en raison de leur ténacité. La compréhension de ce mode d'endommagement est cruciale pour garantir l'usage sécuritaire des engrenages dans des mécanismes. Les normes ne considèrent que la phase finale de ce processus, mais la rupture par fatigue comprend également la nucléation et la croissance des fissures. Dans la pratique, ces étapes sont souvent qualifiées de périodes d'amorçage et de propagation des fissures, ce qui est pris en compte dans les recherches sur la capacité de charge à la racine de la dent, généralement basées sur la norme ASTM E399-22 de flexion en trois points [45].

Des procédés standards sont disponibles dans la littérature pour déterminer la capacité de charge au pied de l'engrenage. Ils comparent la contrainte maximale à la racine de la dent par un facteur fonctionnel aux limites du matériau. Ces procédures standards

considèrent que seule la dureté de l'engrenage modifie la durée de vie en fatigue avec la contrainte maximale sur le pied de dent. Les ingénieurs utilisent la loi de Palmgren-Miner, la règle d'endommagement linéaire et ses modifications pour prédire la durée de vie en fatigue des composants dans le cas de chargement variable. Le Miner LDR est toujours principalement utilisé malgré ses limitations [8].



Figure 2.8 : Rupture en flexion par fatigue au pied d'une dent

Phillipe Blais et al. [9], [13], étudient le comportement mécanique en fatigue sur une seule dent d'engrenages en biocomposites HDPE/bouleau fabriqués par thermocompression, ils examinent le comportement en fatigue des biocomposites en termes de durabilité et d'endommagement : la durabilité est évaluée avec une fréquence de charge de 10 Hz, et ils utilisent trois indices pour caractériser l'endommagement, notamment la mesure de la propagation de la fissure, la mesure de la contrainte résiduelle et l'émission acoustique. Le banc d'essai conçu et utilisé par les chercheurs répond au besoin d'isoler la flexion de la dent et d'ainsi limiter les autres modes d'endommagement. À travers des essais quasi-statiques en flexion simple sur une seule dent, ils déterminent les propriétés mécaniques du matériau à l'échelle de la dent et établissent des comparaisons avec les résultats en flexion trois points de Meiri et al [6]. Ils présentent également à travers des essais de fatigue en flexion sur une seule dent en utilisant le même banc d'essai, une cohérence entre la progression des fissures, la charge résiduelle et l'émission acoustique qui permettent de suivre l'endommagement progressif du matériau. Une modélisation par chaîne de Markov a été employée pour représenter ces indices. Les chercheurs confirment la nature statistique du processus d'endommagement dans les composites à fibres courtes, le modèle démontre une

capacité prédictive de l'endommagement bien que présentant certaines prédictions à surestimer l'amorçage des fissures.

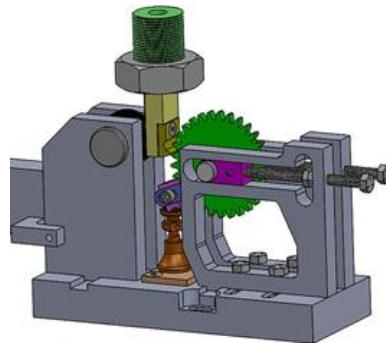


Figure 2.9 : Banc essai utilisé par P. Blais pour isoler la flexion de la dent [9]

2.8 Synthèse de la revue de littérature et originalité de ce mémoire

Ce chapitre nous a permis de passer en revue tour à tour les composites à fibres naturelles courtes, les engrenages composites à matrices thermoplastiques et les modes et mécanismes d'endommagement des engrenages biocomposites. Les différents articles et revues consultés nous ont permis d'avoir une première approche sur les principaux travaux existants. Cette revue de la littérature a mis en évidence le potentiel des biocomposites démontrant des caractéristiques comparables aux thermoplastiques techniques largement utilisés dans diverses applications d'ingénierie. Cependant, il est important de noter que la littérature est relativement limitée en ce qui concerne la transférabilité des propriétés de ces composites à fibres naturelles pour des applications structurelles telles que les engrenages. Les recherches existantes sur l'application des biocomposites aux engrenages sont principalement concentrées au sein de notre groupe de recherche.

L'endommagement par fatigue des engrenages biocomposites présente encore des aspects non explorés par la littérature. L'approche consistant à isoler la fatigue sur une seule dent permet de significativement réduire les effets thermiques présents dans les essais rotatifs. Notre travail de recherche est dans la continuité des travaux effectués

dans notre laboratoire par P. Blais et al. [44]. L'originalité de ce mémoire de maîtrise sera de réévaluer les limites élastiques en flexion du matériau à l'échelle de la dent, en utilisant des mesures par corrélation d'images qui offrent les résultats plus précis que ceux obtenus par les machines d'essai. De plus nous nous pencherons sur l'étude de l'endommagement en fatigue à différents taux de fibres dans les biocomposites et à plusieurs niveaux de chargement.

Chapitre 3 - Méthodologie

3.1 Introduction

Ce chapitre nous permet de définir le cadre méthodologique de notre travail, de la fabrication des échantillons jusqu'à l'analyse des données recueillies. Nous détaillerons la méthodologie, les outils et les matériels utilisés pour la réalisation des objectifs de ce travail de recherche : la méthode de fabrication des différents échantillons, ainsi que les types de montage et plans des essais expérimentaux effectués. La fabrication de nos échantillons a été réalisée au Centre Intégré en Pâte et Papier (CIPP) et dans les laboratoires de l'Université du Québec à Trois Rivières. Les grandes lignes des tests quasi-statiques et de fatigues sont présentées. Les deux méthodes de quantification de l'endommagement en fatigue sont présentées avec leurs équipements respectifs.

3.2 Matériau et Fabrication

Le biocomposite utilisé pour la fabrication des engrenages dans ce travail de recherche est constitué d'une matrice en polyéthylène haute densité (HDPE) associée à une faible teneur de polyéthylène maléique MAPE et des renforts de fibres courtes de bouleau jaune.

Les fibres présentées à la figure 3.1, sont issues de bouleau jaune préparé par le Centre de Recherche en Matériaux Lignocellulosique (CRML) au CIPP par un procédé de pulpe travaillée thermo-mécaniquement (TMP) pour l'obtention d'une maille entre 20 et 60 [18], [44]. Le résultat est une fibre de bois courte ayant une longueur moyenne équivalente à 0.49 mm et un diamètre moyen autour de 24.7 μm (tableau 3.1).

Le tableau 3.2 présente les propriétés physiques et mécaniques des fibres de bouleau.



Figure 3.1 : Fibres de bouleau jaune

Tableau 3.1 : Propriétés géométriques des fibres de bouleau [44].

Dimension	Mesuré
Longueur moyenne : L (mm)	0.49
Largeur moyenne : D (μm)	24.7
Format d'image : L/D	19.79

Tableau 3.2 : Propriétés mécaniques des fibres de bouleau [16].

Fibre	Densité (g/m^3)	Conductivité thermique ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Module de cisaillement (GPa)	Coefficient de poisson	Module d'élasticité (GPa)
Bouleau jaune	0.62	0.15	0.94	0.45	13.9

La matrice, quant à elle, est composée du HDPE fournie par NOVA Chemicals (HOPE clair 2909) et du MAPE qui agit comme agent de couplage afin d'optimiser l'interface fibre/matrice. Les deux composants sont illustrés aux figure 3.2 et figure 3.3.

Les fibres composent soit 0, 20, 30 ou 40% du poids total du composite, l'agent de couplage représente 3% du poids de composite.



Figure 3.2 : Granulés de HDPE



Figure 3.3 : MAPE

Tableau 3.3 : Propriétés mécaniques des éléments de la matrice [9]

Matrice	Module d'élasticité (GPa)	Allongement à la rupture (%)	Coefficient de poisson	Resistance à la traction (MPa)
HDPE	1.27	590	0.46	22.0
MAPE	0.12-0.55	450-810	-	16

La fabrication des engrenages en biocomposites se déroule en trois grandes étapes, décrites dans l'illustration ci-dessous :

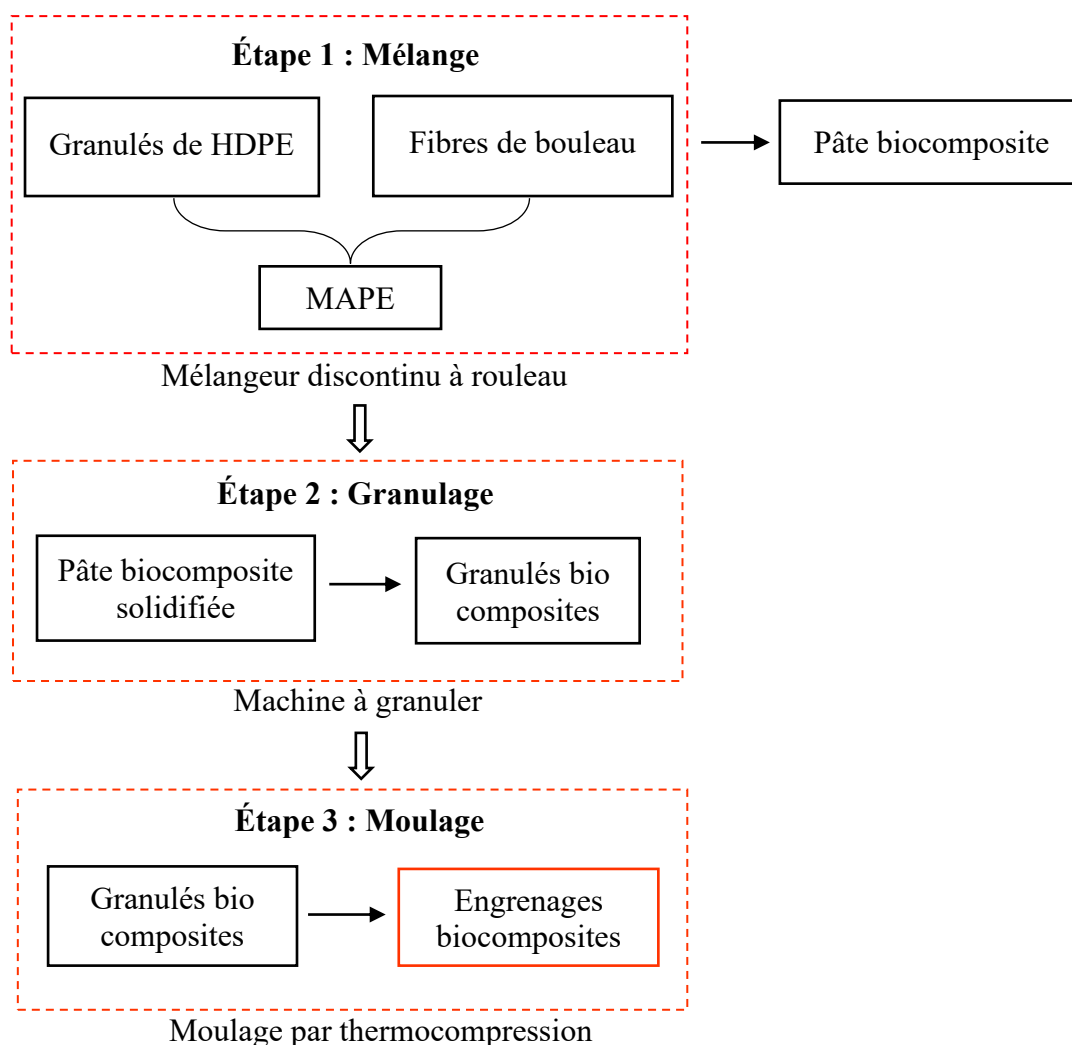


Figure 3.4 : Étape de fabrication des engrenages biocomposites

Tel que présenté par P. Blais [44] et illustré à la figure 3.4, la première étape de fabrication est le mélange des trois éléments entrants (HDPE, fibres de bouleau et MAPE) à l'aide d'une paire de rouleaux chauffants (figure 3.5). Une fois la température de 190 degrés Celsius atteinte, une petite quantité, environ 15 grammes de HDPE est déposée sur les rouleaux. Lorsque le HDPE est fluide, le MAPE est ajouté. L'ajout de ce

dernier dans une petite partie du HDPE améliore sa distribution au sein de la matrice finale. Ensuite, le reste du HDPE est lentement placé sur les rouleaux afin de conserver un état fondu. Finalement, les fibres sont déposées à petites doses dans le but de garder la matrice dans un état malléable. Le résultat est mélangé et retourné trois à quatre fois à quelques minutes d'intervalle pour assurer l'uniformité du composite. Une fois retiré des rouleaux, le composite est découpé en petit morceau et laissé libre pour refroidissement (figure 3.6).

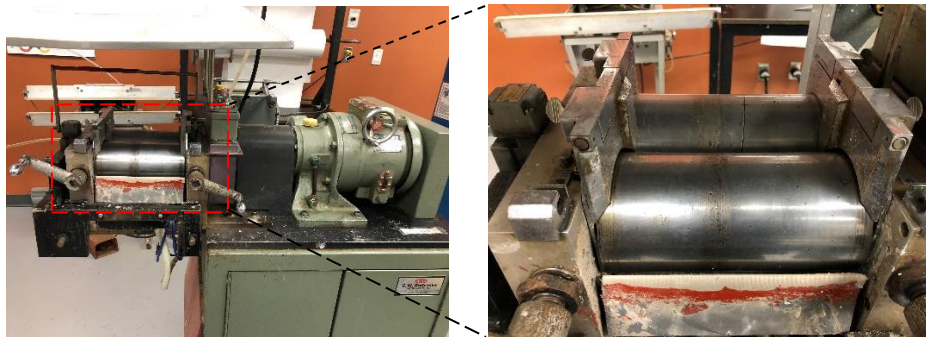


Figure 3.5 : Mélangeur discontinu à rouleaux Brabender Thermotron



Figure 3.6 : : Morceaux de biocomposite solidifié

La deuxième étape consiste à broyer les morceaux de biocomposite solidifiés à l'aide d'une machine grinder (figure 3.7), afin d'obtenir des granulés de biocomposites (figure 3.8)



Figure 3.7 : Machine à granuler Grinder



Figure 3.8 : Granulés de biocomposites

La troisième grande étape de fabrication des engrenages biocomposites consiste à mouler les granulés biocomposites par thermocompression à l'aide de la thermo presse Dake (figure 3.9). Cette opération nous permet d'aboutir aux engrenages.

En ce qui concerne les engrenages en 100 % de HDPE (c'est à dire sans les fibres), les granulés commerciaux de HDPE sont directement moulés pour obtenir les engrenages.



Figure 3.10 : Thermopresse Dake



Figure 3.9 : Moule A283

Après le moulage, l'engrenage est préparé pour les tests de flexion en retirant une dent et en effectuant des opérations de perçage et d'alésage dans le but de pouvoir l'adapter sur un axe de 0.500 Po et de positionner une enclume à la base de la dent. Ces étapes sont réalisées avec précision à l'aide d'une perceuse à colonne. Cette préparation des échantillons permettra d'effectuer les tests de flexion sans rotation [44]. Les engrenages résultants sont ensuite illustrés dans la figure 3.11.



Figure 3.11 : Engrenages en biocomposites

3.3 Étude en statique du comportement en flexion d'une dent d'engrenage en biocomposite

L'étude en statique nous permet de qualifier le comportement mécanique de base du biocomposite. Nous aborderons cette étude suivant deux approches : une approche analytique avec des hypothèses simplificatrices nous permettant d'écrire les équations de la déformation à la racine de la dent et du déplacement maximal de la dent ; ensuite par une approche expérimentale où on effectuera des essais quasi statiques sur les dents d'engrenages pour évaluer la déformation à la racine et le déplacement maximal de la dent par corrélation d'images. Les deux approches feront objet de comparaison.

3.3.1 Approche analytique

- **Analyse des forces appliquées sur une dent**

Lors d'un engrènement de dents d'engrenages, la charge appliquée W à la dent a la même direction que la ligne d'engrènement et peut donc se décomposer en une charge tangentielle W_t et une charge radiale W_r [46], [47]. (Figure 3.12)

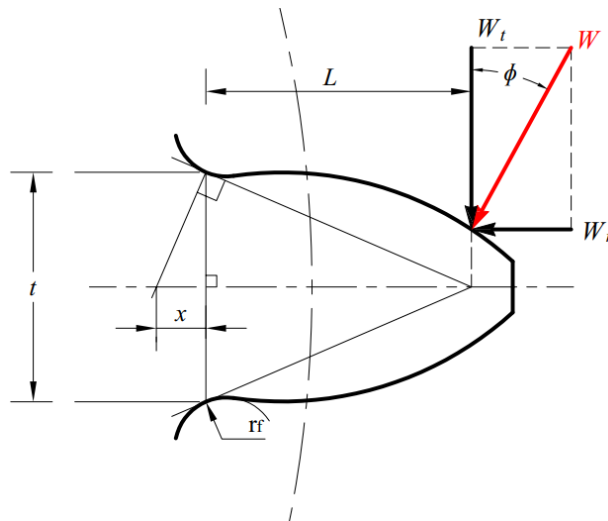


Figure 3.12 : chargements sur une dent d'engrenage. Adapté de [46]

$$W = W_t / \cos\phi \quad (E.3.1)$$

$$W_r = W \cdot \sin\phi = \frac{W_t}{\cos\phi} \sin\phi = W_t \tan\phi \quad (E.3.2)$$

- **Contrainte de flexion à la racine de la dent**

Formule de Lewis : Hypothèses et formulation [46]

La force transmise W sur une dent d'engrenage engendre une contrainte de flexion (due à l'effort tangentiel W_t) et de compression à la racine de la dent (due à l'effort radial W_r).

Hypothèses posées :

Hypothèse 1 : On néglige la force radiale et on suppose que la dent est une poutre encastrée à la racine et soumise à une force tangentielle W_t à son extrémité.

Hypothèse 2 : On ne prendra pas en considération les concentrations de contraintes

Hypothèse 3 : On considéra que la charge est reprise par une seule dent

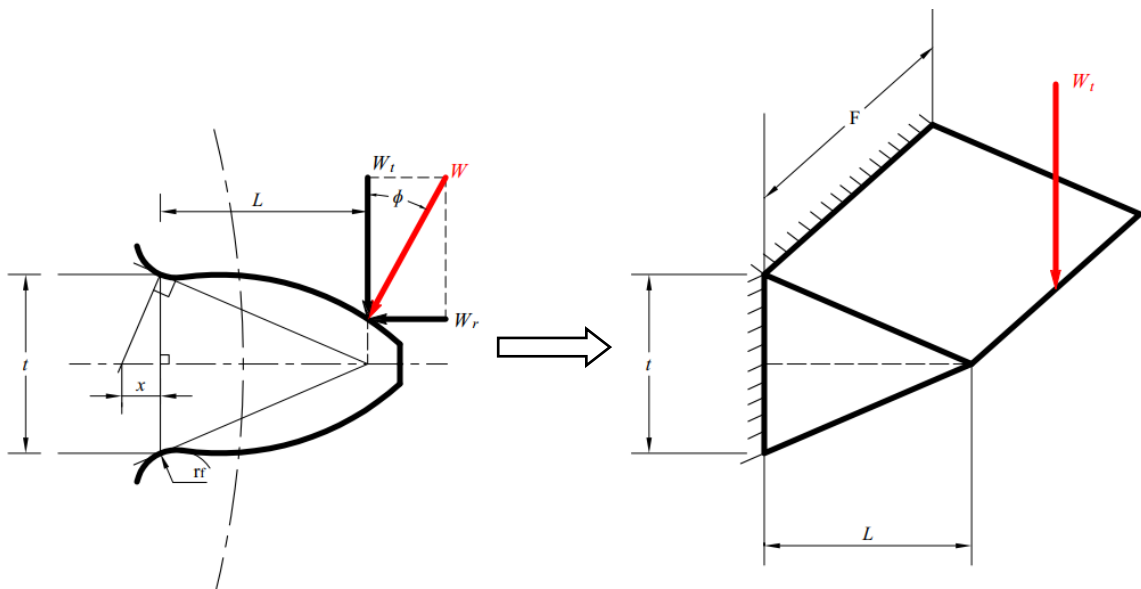


Figure 3.13 : Applications des hypothèses de Lewis à une dent. Adapté de [46]

Formulation :

F est la largeur de la dent, t est l'épaisseur de la dent à la racine, L est la distance du point d'application de la charge à l'encastrement (ces valeurs sont à l'annexe 1).

En utilisant l'équation de flexion $\sigma = Mc/I$ avec $M = W_t L$ et $I/c = Ft^2/6$, la contrainte maximale à l'encastrement est donnée par :

$$\sigma = \frac{6W_t L}{Ft^2} \quad (E.3.3)$$

En se référant à la figure 3.13, et en utilisant les propriétés des triangles semblables, on a :

$$\frac{x}{t/2} = \frac{t/2}{L} \Rightarrow x = t^2/4L$$

En réarrangeant l'équation de la contrainte maximale, on a :

$$\sigma = \frac{6W_t L}{FC} = \frac{W_t}{Ft^2/6L} = \frac{W_t}{\frac{2}{3} F x}$$

Si le numérateur et le dénominateur sont multipliés par P (*pas diamétral*)

$$\sigma = \frac{W_t P}{\frac{2}{3} F x P} = \frac{W_t P}{F Y} \quad (\text{Formule de Lewis})$$

$$\sigma = \frac{W_t P}{F Y} \quad \text{avec} \quad Y = \frac{2}{3} x P = \frac{t^2 P}{6L} = \frac{t^2 \pi}{6Lp} \quad (E.3.4)$$

Y est le facteur de forme de Lewis. Sa valeur peut être déterminée de deux façons : soit pour une seule paire de dents en contact (au début et à la fin de l'engrènement), soit pour plus d'une paire de dents en contact vers le point primitif. Compte tenu du phénomène

de répartition de charge, la deuxième méthode est privilégiée pour les engrenages en plastique [48] (les valeurs sont fournies en annexe 2)

Plusieurs autres facteurs de correction de la formule de Lewis sont recommandés dans les directives de la norme allemande VDI 2545 [49] pour les engrenages en plastique.

▪ **Déformation à la racine de la dent**

En s'intéressant uniquement dans cette étude à la déformation dans le domaine élastique ϵ , on peut se servir de la relation de Hooke pour exprimer l'équation de la déformation à la racine de la dent :

$$\sigma = \frac{W_t P}{F Y} = \epsilon E$$

$$\Rightarrow \frac{W_t P}{F Y} = \epsilon E$$

$$\epsilon = \frac{W_t P}{E F Y} = \frac{P}{E F Y} W_t$$

$$\boxed{\epsilon = \frac{P}{E F Y} W_t} \quad (E.3.5)$$

Où E est le module d'élasticité du matériau (Nous nous servirons des résultats des travaux de Agbelenko Koffi et al. [16] qui dans leurs travaux, ont évalué les valeurs des modules d'élasticité des biocomposites HDPE/bouleau à plusieurs pourcentages de fibres), P le pas diamétral de l'engrenage, F la largeur de la dent, Y le facteur de forme de Lewis, W_t la force appliquée sur la dent.

- **Déplacement maximal de la dent**

On considérait cette fois-ci que la dent peut être assimilée à une poutre encastrée de section rectangulaire constante sur toute sa longueur.

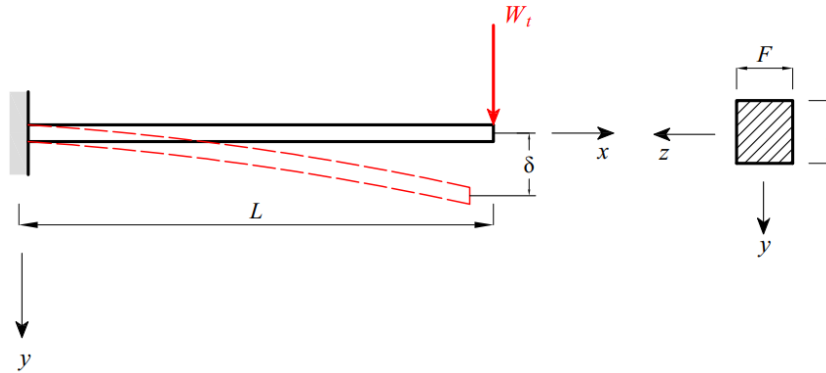


Figure 3.14 : Dent d'engrenage considérée comme une poutre encastrée

En utilisant l'équation de déflexion maximale d'une poutre de longueur L encastrée à une de ses extrémités dont l'autre extrémité est soumise à une charge verticale P

$$\delta = PL^3 / 3 EI$$

$$P = W_t \Rightarrow \delta = \frac{W_t L^3}{3 EI}$$

Où E est le module d'élasticité du matériau, I le moment d'inertie de la section par rapport à l'axe z

Pour une section rectangulaire $h \times b$, $I = bh^3/12 \Rightarrow I = Ft^3/12$

$$\delta = \frac{4W_t L^3}{E F t^3} = \frac{4 L^3}{E F t^3} W_t \quad \boxed{\delta = \frac{4 L^3}{E F t^3} \cdot W_t} \quad (E.3.6)$$

Avec F la largeur de la dent, t épaisseur à la tête de la dent, L la hauteur de la dent

3.3.2 Approche expérimentale : Réalisation des essais quasi statiques de flexion sur des dents d'engrenages et utilisation de la corrélation d'images pour analyser les déformations et les déplacements

Les essais quasi statiques réalisés dans cette étude ont été effectués sur des dents d'engrenages constitués de 0%, 20%, 30% et 40% de fibres de bouleau. Pour chaque pourcentage, 03 essais ont été réalisés.

- **Préparation des essais**

Préparation des échantillons : Moucheter les échantillons

Cette étape est très importante dans le processus de corrélation d'images, la qualité des images à corréler dépend fortement de cette étape. Le principe de corrélation d'images est basé sur le suivi des informations d'une image dite de « référence » dans les images suivantes appelées images déformées. On peut donc voir la corrélation d'images comme le suivi de points sur les surfaces observées : Suivre les déplacements d'une surface d'un échantillon est équivalent à suivre les déplacements de tous les points de cette surface. Le mouchetis (figure 3.15) a été réalisé à l'aide de deux bonbonnes de peinture noire et blanche de marque RUST-OLEUM adaptées pour des surfaces en plastique. On commence par appliquer la peinture blanche complètement sur l'engrenage, puis on fait des petits jets de peintures noires (ou inversement).



Figure 3.15 : Réalisation du Mouchetis sur les dents d'engrenage

▪ Préparation des appareillages

Les essais sont effectués sur une machine électromécanique de type Intron – LM-U 150 à vitesse lente à 2 mm/min, avec une cellule de charge de 50 kN. La machine d'essai est reliée à un ordinateur au travers d'un logiciel (le logiciel Test Loop) qui permet de piloter l'essai. L'échantillon est immobilisé grâce au dispositif de montage de P. Blais [44] spécialement conçu pour ce type d'essai (figure 3.16).

Lorsque le poinçon est idéalement positionné, on ramène la position du poinçon à zéro dans le logiciel avant de débiter l'essai. Le logiciel Test Loop enregistre les valeurs des déplacements du poinçon en fonction de la force appliquée sur la dent au cours l'essai

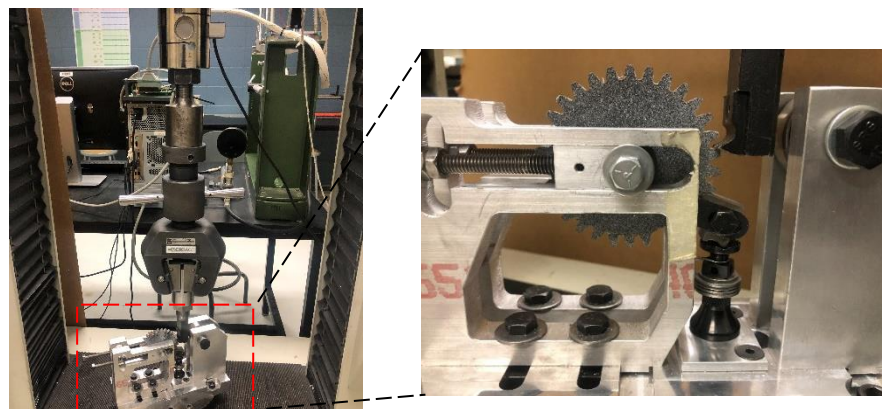


Figure 3.16 : Dispositif de montage des engrenages

Pour ce type d'essai, on aura juste besoin d'une seule caméra pour enregistrer les images car la surface étudiée est plane. La caméra utilisée est une caméra CCD, elle permet d'obtenir des images numériques avec une définition de 1280×1024 pixels. Les images sont enregistrées à une fréquence de 1 Hertz c'est-à-dire à une image chaque seconde. Ces images sont ensuite traitées sur le logiciel Aramis (GOM Correlation 2D) qui nous permet d'obtenir des cartographies des champs de déplacements et déformations réelles de la dent sur toutes les images (figure 3.18 ; figure 3.19). Il est très important avant de lancer le calcul des déformations et de déplacements dans Aramis,

d'appliquer le facteur d'échelle sur l'image de référence (la première image, image non déformée) pour ramener les dimensions de l'image aux dimensions réelles de la dent. Notons qu'à chacune des images enregistrées, on est en mesure, en faisant une correspondance avec la variable de temps t de savoir quelle charge est appliquée sur la dent. Ce qui nous donne donc des données de force-déplacement ou force-déformations. Afin d'avoir une bonne dispersion de l'évolution force-déplacement ou force-déformation, on utilisera 10 points (images), pris sur des intervalles de temps réguliers durant l'essai.

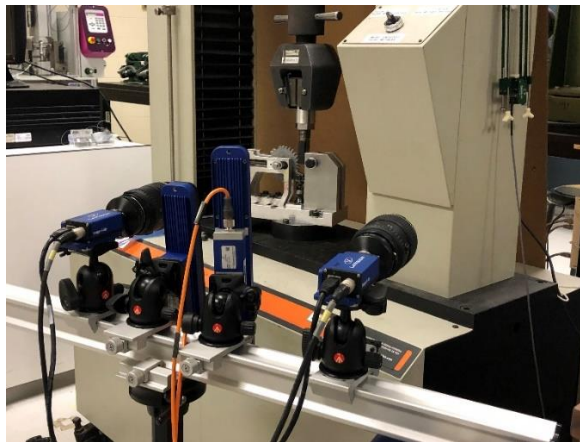


Figure 3.17 : Camera CCD LaVision

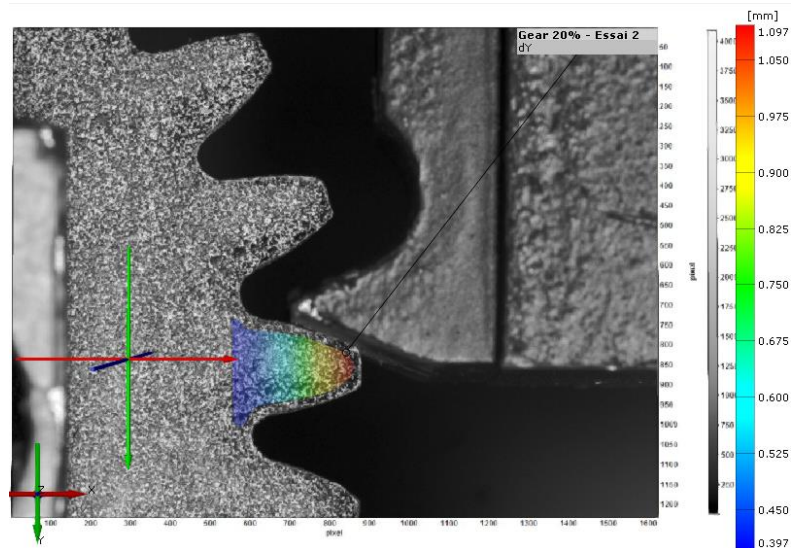


Figure 3.18 : Cartographie des déplacements réels sur une dent à un instant t de l'essai

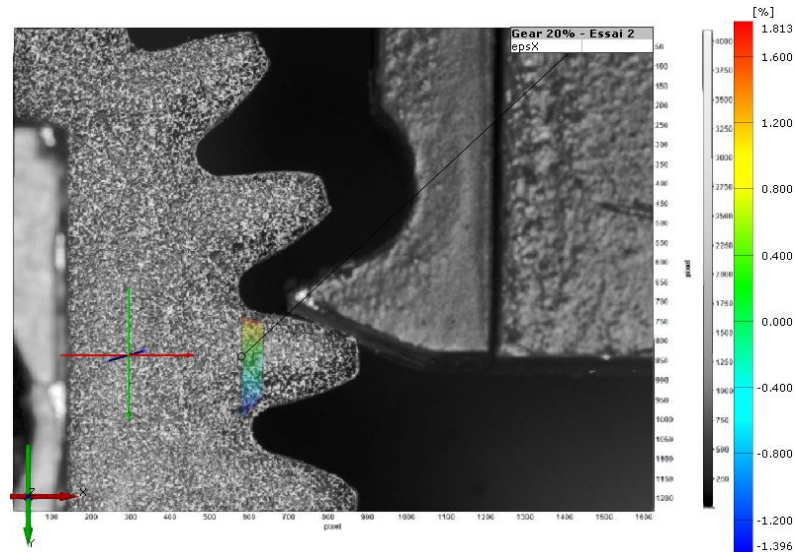


Figure 3.19 : Cartographie des déformations réelles à la racine d'une dent à un instant t de l'essai

3.4 Étude en fatigue du comportement en flexion d'une dent d'engrenage en biocomposite

Il existe deux grandes approches dans la littérature pour aborder une étude de fatigue; l'approche par simulation numérique complète ou l'approche expérimentale. Dans le cadre de notre étude, l'étude de fatigue est réalisée par une approche expérimentale. La section qui suit nous permettra de décrire les méthodes et outils de mesures de quantification de l'endommagement en fatigue des échantillons.

3.4.1 Méthodes et outils de mesure

La littérature propose plusieurs méthodes pour quantifier l'endommagement des échantillons lors des tests en fatigue, les méthodes que nous utiliserons dans cette étude sont les mesures de **résistance résiduelle** et de **fissuration**. Dans cette section, nous examinerons en détail de la mise en œuvre de ces deux méthodes, ainsi que les corrélations attendues entre elles.

- **La résistance résiduelle**

Les tests de fatigue se caractérisent par une diminution progressive de la résistance résiduelle des échantillons, avec trois étapes de réduction observables : une première réduction rapide, la seconde sous forme de plateau puis une troisième rapide conduisant à la rupture du matériau (figure 3.20). Les tests de fatigue se déroulent à déplacement imposé et la résistance résiduelle correspond à la force mesurée par la cellule de charge au déplacement maximal dans le cycle de fatigue. Pour obtenir le signal (force/déplacement) d'un cycle de sollicitation en fatigue précis, 15 points sont enregistrés afin d'avoir au moins un point près du maximum à chaque cycle. Les données sont recueillies sous forme de fichier texte et sont par la suite extraites avec un programme Python vers une feuille Excel (code python disponible à l'annexe 3). La valeur de charge est normalisée par rapport à sa valeur initiale pour obtenir une mesure entre 0 et 1.

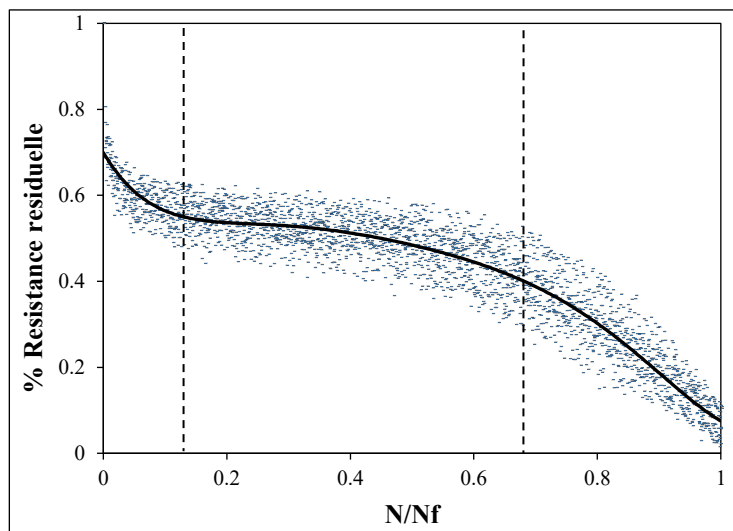


Figure 3.20 : Étapes d'évolution de la résistance résiduelle

▪ La fissuration

La fissure est quantifiée par sa longueur relative à la largeur maximale de la dent de l'engrenage afin que l'indice se retrouve entre 0 et 1. La mesure de la fissure est assurée par deux caméras de type Arducam adaptée pour des échantillons de petites dimensions. Ces caméras sont placées perpendiculairement de part et d'autre des deux faces de la dent d'engrenage testée. Les images sont prises à des intervalles réguliers au cours de l'essai. Le logiciel *ImageJ* nous permet de ramener ces images obtenues à la même échelle de grandeur que celles des dimensions réelles de la dent et de mesurer ainsi la taille de la fissure sur la dent.

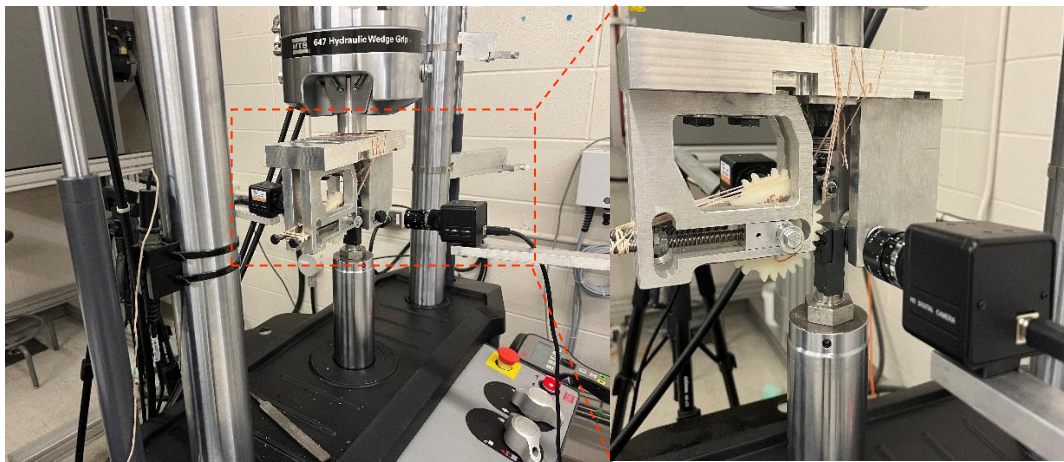


Figure 3.21: Disposition des caméras de type Arducam

3.4.2 Essai de fatigue

Les essais de fatigue ont été réalisés à l'aide d'une machine de type MTS hydraulique couplée d'une cellule de charge de 100 kN (figure 3.22). La machine est équipée une fois de plus, avec le dispositif de montage des engrenages utilisé pour les essais quasi statiques (figure 3.16) et de deux caméras pour assurer le suivi de l'évolution de la fissure. La variable contrôlée est le déplacement, car les charges attendues sont trop faibles par rapport à la valeur maximale de la cellule de charge. Les

déplacements sont fixés à l'aide des résultats des tests quasi statiques et validés grâce à des tests de fatigue préliminaire.

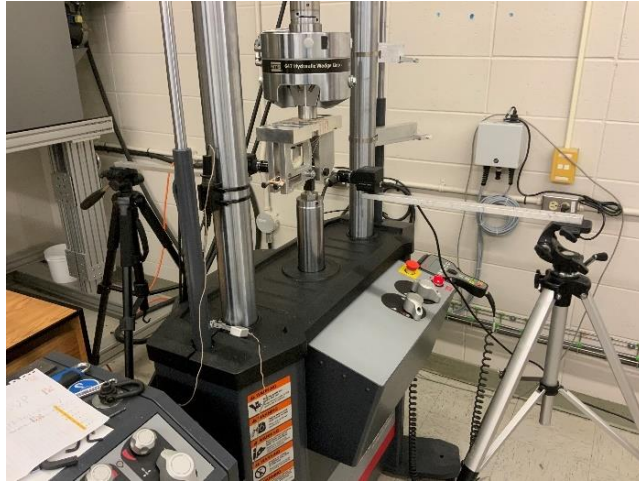


Figure 3.22 : Machine de type MTS hydraulique

Selon les résultats de recherche de Mejri et al., [6] et de P. Blais et al. [9], il est recommandé d'utiliser une fréquence de chargement de 10 Hz afin d'avoir une progression non abrupte de la fissure, et ainsi pouvoir différencier les différentes étapes d'endommagement. En outre, une fréquence de 10 Hz se traduit par une rotation de l'engrenage de 600 tours par minute. Selon les dimensions de l'engrenage dans notre cas, une vitesse de rotation de 600 tours par minute correspond à une vitesse tangentielle de 2.4 m/s ($V = \omega \cdot r$), ce qui est plausible pour un engrenage en plastique [44]. La fonction de déplacement résultante est illustrée à la figure 3.23.

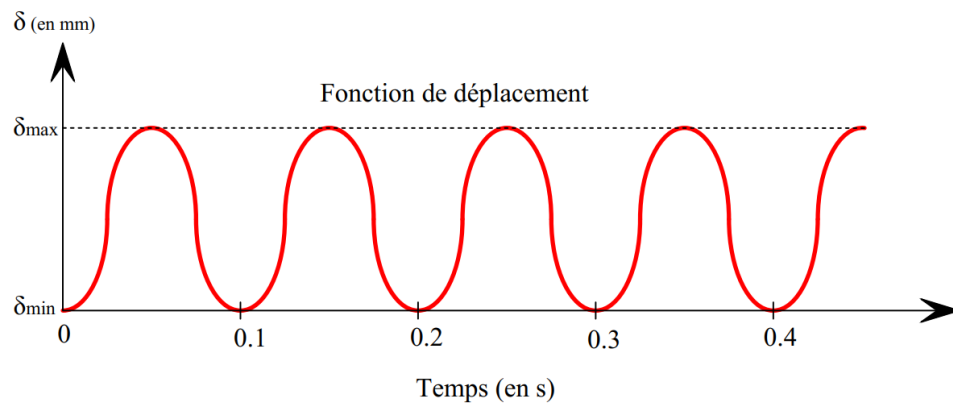


Figure 3.23 : Fonction de déplacement

3.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter le cadre méthodologique de nos travaux de recherche. Premièrement, la fabrication des échantillons a été présentée. Les différentes études réalisées sont ensuite énumérées notamment l'étude statique en flexion et l'étude de fatigue. L'étude en statique a été abordée et présentée selon deux approches; une approche analytique et une approche expérimentale. Les hypothèses posées pour écrire les équations analytiques de déplacements et de déformations sont présentées ; les protocoles de l'étude expérimentale en statique sont décrits. L'étude en fatigue a été abordée expérimentalement; deux indices d'endommagement (la résistance résiduelle et la fissuration) ont été choisis et présentés pour quantifier le comportement en fatigue de nos échantillons. Les protocoles des essais de fatigues sont également décrits.

Chapitre 4 - Analyses et interprétations des résultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, seront présentés, analysés et interprétés les résultats obtenus des différentes études réalisées et présentées précédemment. Il sera divisé en deux grandes parties. Tout d'abord nous présenterons les résultats de l'étude en statique (des comparaisons entre l'étude analytique et expérimentale seront présentées enfin de voir les fluctuations entre les deux approches); ensuite, nous présenterons les résultats de l'étude en fatigue notamment l'évolution de la résistance résiduelle et de la fissuration. Nous mettrons en exergue les corrélations entre ces deux indices d'endommagement en fatigue et enfin nous présenterons les durées de vie de nos échantillons.

4.2 Analyses et interprétations des résultats de l'étude en statique

L'étude en statique est nécessaire pour quantifier les propriétés mécaniques de base du matériau. Elle fournit également les informations nécessaires pour effectuer l'étude en fatigue. Bien que le matériau présente d'autres comportements au-delà du domaine élastique, nous avons limité notre étude au domaine élastique; cette limitation nous a permis non seulement d'utiliser la corrélation d'images pour analyser les déplacements et les déformations réelles des échantillons mais aussi d'aborder plus aisément cette étude par une approche analytique avec des hypothèses simplificatrices.

La pente des courbes forces-déplacements traduit la raideur des échantillons en flexion ; La pente des courbes forces-déformations traduit la rigidité des échantillons en flexion, puisque ces courbes peuvent aisément être ramenées aux courbes des contraintes-déformations.

Les figures 4.1 et 4.4 présentent respectivement les récapitulatifs des résultats des forces-déplacements et des forces-déformations. Elles indiquent la moyenne des résultats expérimentaux de toutes les différentes dents testées, renforcées de 0% à 40% de bouleau, associés aux résultats théoriques en guise de comparaison. Ces résultats montrent que les échantillons non renforcés atteignent dans le domaine élastique, une

force maximale légèrement supérieure que les échantillons renforcés de 20% et 30% de fibre de bouleau, mais avec une déflexion et une déformation relative beaucoup plus importante (Tableau 4.1 et Tableau 4.2). Les figures 4.2 et 4.5 montrent que l'ajout des fibres de bouleau augmente considérablement la raideur et le module d'élasticité en flexion des échantillons, on note une raideur de 213.18/219.54 N/mm (expérimental/théorique) et un module de flexion de 2.06 GPa pour les engrenages non renforcés, versus une raideur de 527.12/565.18 N/mm et le module de flexion de 5.00 GPa pour les engrenages renforcés à 40% de fibre de bouleau. L'écart entre le modèle théorique et expérimental est visible mais les résultats sont relativement proches.

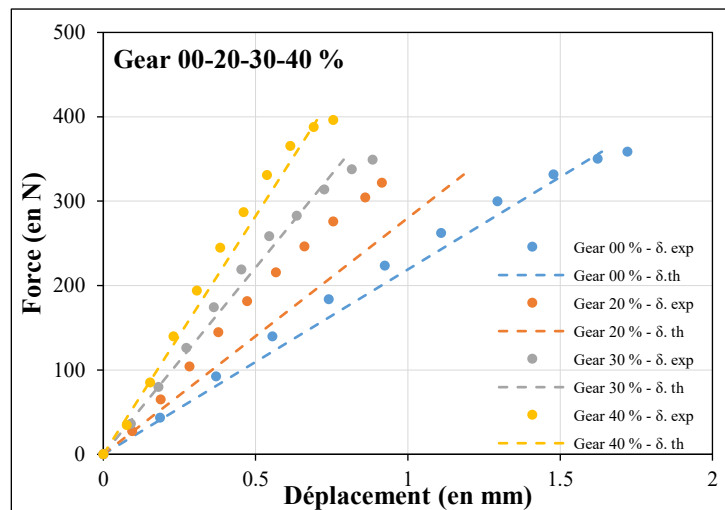


Figure 4.1 : Courbes des forces-déplacements

Tableau 4.1: Résultats des déplacements et raideurs de la dent à la force maximale

Partie linéaire (domaine élastique)					
Engrenages	Force max. $(W_t)_{max}$ (en N)	Dépl.exp. δ_{exp} (en mm)	Dépl.th δ_{th} (en mm)	Raideur k (en N/mm)	
				k_{exp}	k_{th}
Gear 00%	358.66±30.78	1.72±0.35	1.64±0.14	213.18±26.03	219.54±0.05
Gear 20%	335.97±13.96	0.953±0.1	1.20±0.05	355.19±23.44	280.21±0.28
Gear 30%	349.23±5.98	0.90±0.01	0.79±0.01	390.17±2.41	442.62±0.25
Gear 40%	396±0.71	0.76±0.06	0.70±0.00	527.12±30.30	565.18±0.31

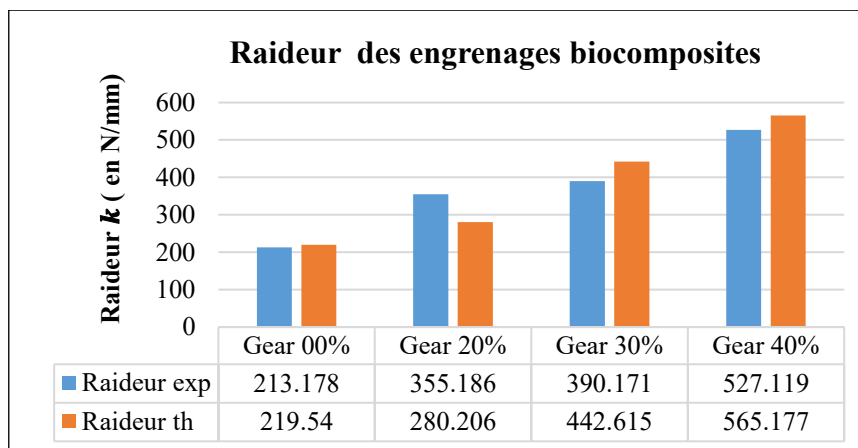


Figure 4.2 : Raideur des engrenages biocomposites

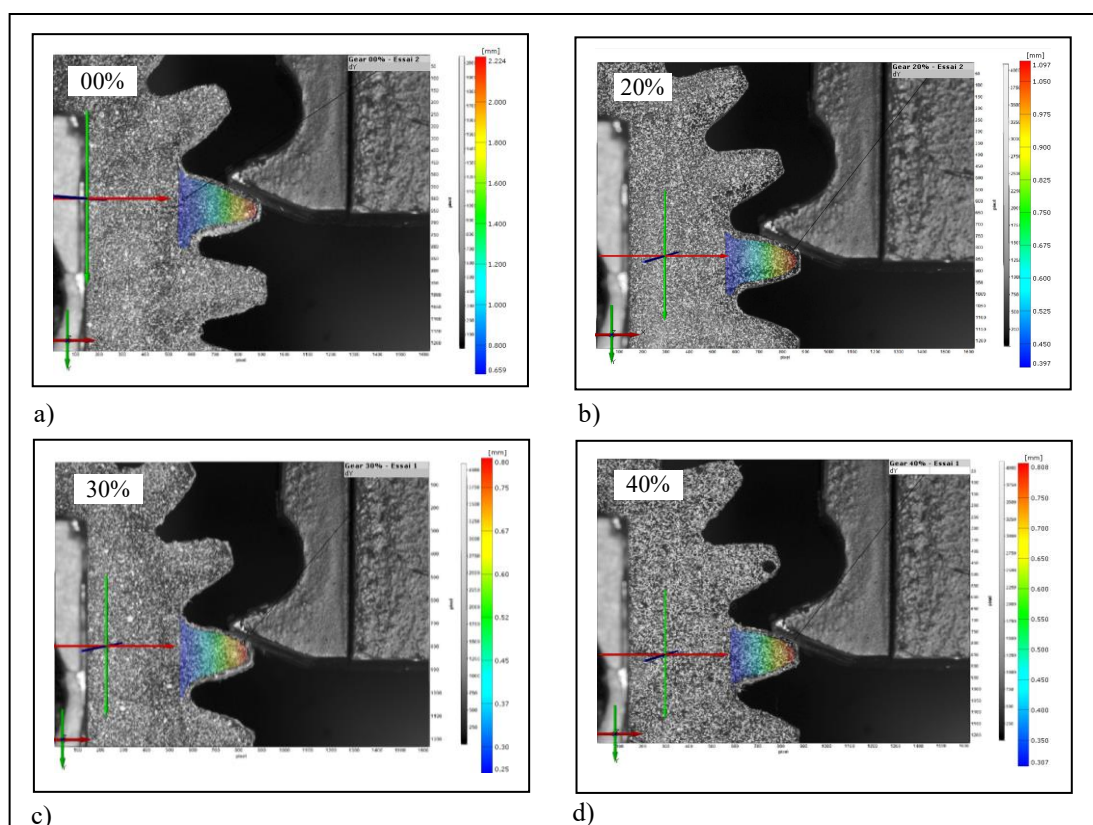


Figure 4.3 : Cartographie des déplacements à la force maximale sur les biocomposites

La cartographie des déplacements (figure 4.3) nous montre que les déplacements sont max au bout de la dent. Ce qui fait du sens et vient justifier l'hypothèse de Lewis, la dent d'engrenage peut être vu comme une poutre encastrée à une de ses extrémités.

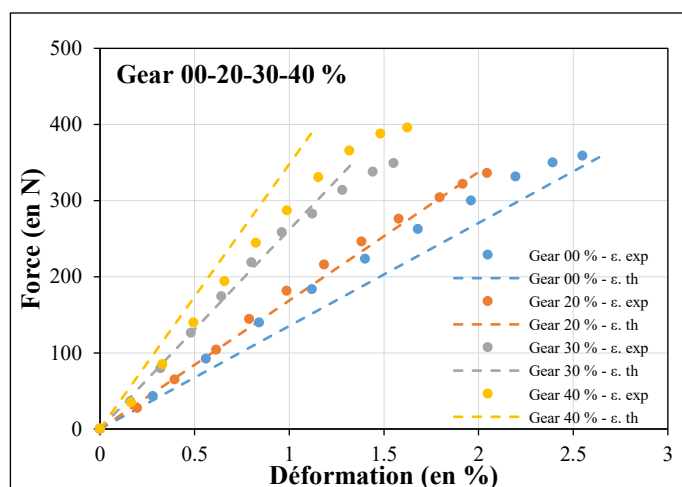


Figure 4.4 : Courbes des forces – déformations

Tableau 4.2 : Résultats des déformations et des modules de flexion des engrenages

Partie linéaire (domaine élastique)					
Engrenages	Force max. $(W_t)_{max}$ (en N)	Contrainte max. σ_{fmax} (en MPa)	Déf. exp ϵ_{exp} (en %)	Déf. th. ϵ_{th} (en %)	Module de flexion E_f (en GPa)
Gear 00%	358.66±30.78	51.50±4.42	2.55±0.49	2.65±0.22	2.06±0.21
Gear 20%	335.97±13.96	48.25±2.01	2.05±0.06	1.95±0.08	2.44±0.06
Gear 30%	349.23±5.98	50.15±0.86	1.57±0.29	1.29±0.22	4.01±0.15
Gear 40%	396±0.71	56.86±0.14	1.62±0.03	1.14±0.00	5.00±0.00

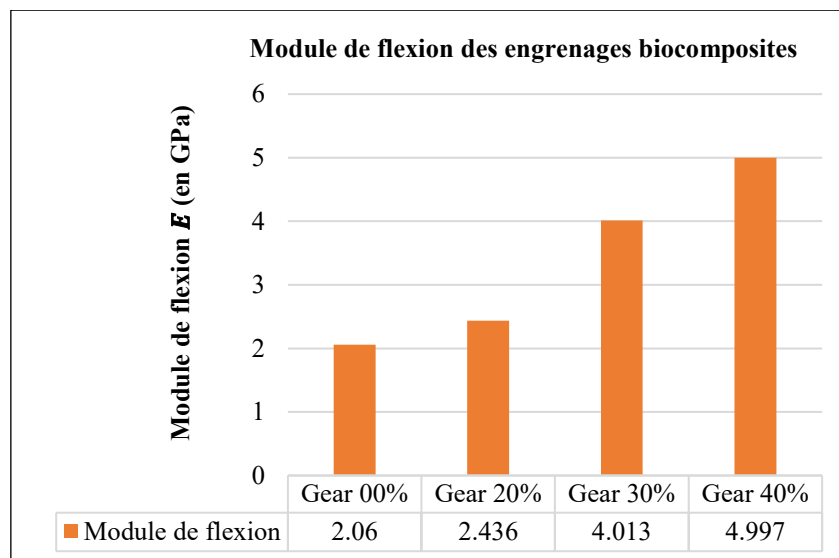


Figure 4.5 : Module de flexion des engrenages biocomposites

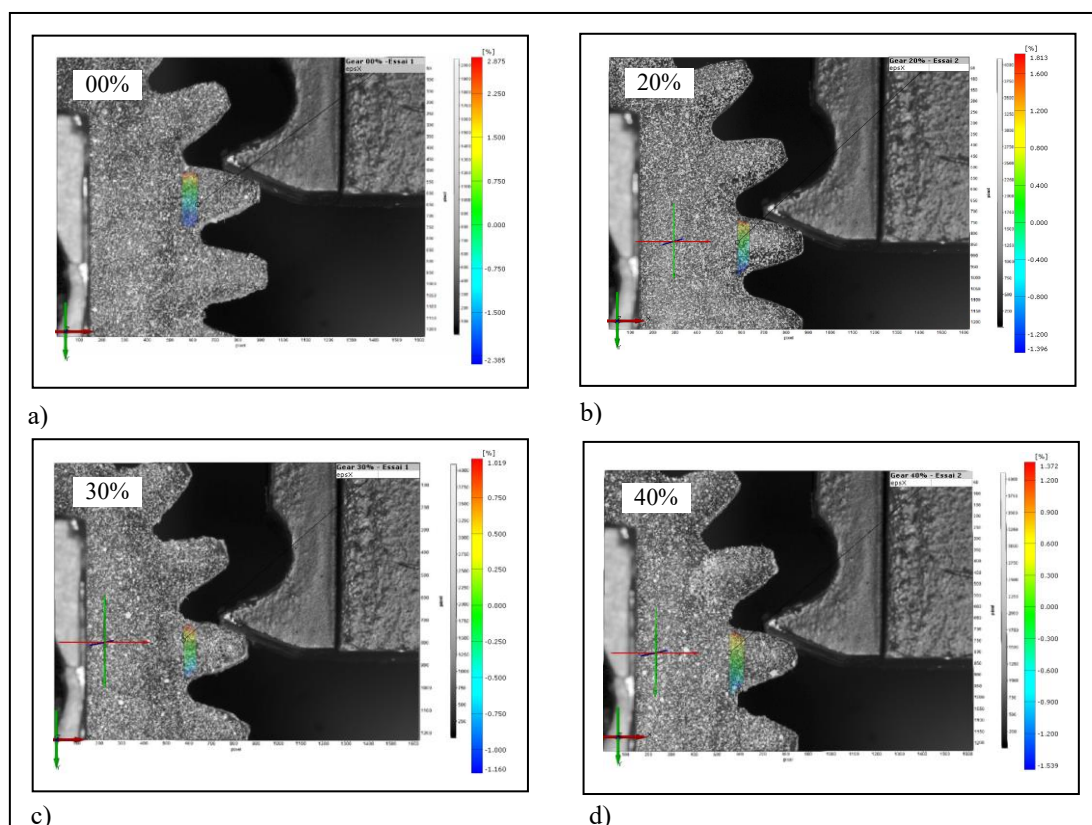


Figure 4.6 : Cartographie des déformations à la force maximale sur les biocomposites à la racine de la dent

La cartographie des déformations (figure 4.6) montre une zone de déformations négatives (zone en compression) et une zone de déformation positive (zone en traction). Ce qui fait du sens également, car la dent est sollicitée en flexion.

▪ Comparaison en quasi-statique avec les résultats de la littérature

Les résultats des dents en biocomposites renforcés de 40% de bouleau ont présenté des propriétés intéressantes. Une comparaison (Tableau 4.3) est réalisée avec les résultats de Mejri et al. [6] (flexion trois points) et ceux de P. Blais et al. [9] (flexion simple dent). Afin de mettre en valeur les propriétés mécaniques du biocomposites renforcé de 40% de bouleau, une autre comparaison (Tableau 4.4) est réalisée avec les polyamides (Nylon).

Tableau 4.3 : Comparaison des résultats avec Mejri et al. [6] et de P. Blais et al [9]

Engrenages	Nos résultats		Mejri et al.		P. Blais et al.	
	σ_{fmax}	E_f	σ_{fmax}	E_f	σ_{fmax}	E_f
Gear 40%	56.86 MPa	5.00 GPa	56.2 MPa	2.54 GPa	72.5 MPa	-

Tableau 4.4 : Comparaison des résultats avec les Polyamides

Nos résultats Gear 40%		PA 11 (Nylon 11) [6]		PA6, PA66 [6] (Nylon 6, Nylon 66)	
σ_{fmax}	E_f	σ_{fmax}	E_f	σ_{fmax}	E_f
56.86 MPa	5.00 GPa	45.00 MPa	1.38 GPa	114.80 MPa	2.32 GPa

Mejri fait des essais en mode flexion trois points, avec des échantillons dont l'effet de la concentration des contraintes lié à la géométrie de l'échantillon est réduit par rapport aux échantillons d'engrenages. P. Blais fait des essais de flexion simples dents

avec une vitesse d'avance de machine de 5mm/min (nous avons utilisé une vitesse de 2mm/min); De plus les données d'analyses de résultats de P. Blais sont basées sur des données machines qui évaluent en réalité le déplacement du contact poinçon-échantillon et non les déplacements réels de la dent. Toutes ces explications peuvent aider à comprendre la variabilité des résultats obtenus.

Le Tableau 4.4 montre que le biocomposite renforcé de 40% de fibres de bouleau, présente un module de flexion supérieur au PA11 et au PA6/66. La contrainte maximale de biocomposite est également supérieure à celle du PA11. Le potentiel du biocomposite en statique est comparable à plusieurs thermoplastiques techniques.

4.3 Analyses et interprétations des résultats de l'étude en fatigue

L'étude en fatigue permet d'analyser le processus de cycle de vie des échantillons à différents niveaux de chargement (ou de déplacement imposé). Quatre niveaux d'imposition de déplacement ont été fixés dans cette étude : 0.45 mm, 0.55 mm, 0.65 mm, 0.75 mm ; ces niveaux d'impositions de déplacement ont été fixés grâce aux résultats de l'étude en statique qui nous renseigne sur les déplacements max que peuvent supporter les échantillons dans le domaine élastique. Le but est d'étudier le comportement en fatigue des échantillons à plusieurs niveaux charges en approchant (sans dépasser) le chargement maximal que peut supporter les échantillons dans le domaine élastique. Ces niveaux de chargement sont validés par des tests préliminaires de fatigue avant de débiter l'essai. Le tableau 4.5 suivant présente les pourcentages du niveau d'imposition fixé par rapport au déplacement maximal des différents échantillons dans le domaine élastique.

Tableau 4.5 : Niveau de déplacement imposé par rapport déplacement max

Imposition de déplacement	Imposition / déplacements max (en %)		
	Gear 00%	Gear 20%	Gear 30%
0.45 mm	26%	47%	50%
0.55 mm	32%	58%	61%
0.65 mm	37%	68%	73%
0.75 mm	44%	78%	84%

4.3.1 Durées de vie

La durée de vie ici représente le nombre de cycles nécessaire pour faire apparaître la fissure et la propager jusqu'à une taille critique ; la taille critique ici représente la taille de fissuration correspondante à une réduction de la résistance résiduelle de 90%, les valeurs de la résistance résiduelle sont facilement contrôlables puisqu'elles sont fournies directement par la machine de test de fatigue. Afin d'avoir un échantillonnage acceptable pour ce type d'essai, les résultats de cinq échantillons sont affichés pour chaque niveau de chargement. La figure 4.7 présente les durées de vie des échantillons. Le tableau 4.6 présente les durées de vie moyennes à chaque niveau d'imposition.

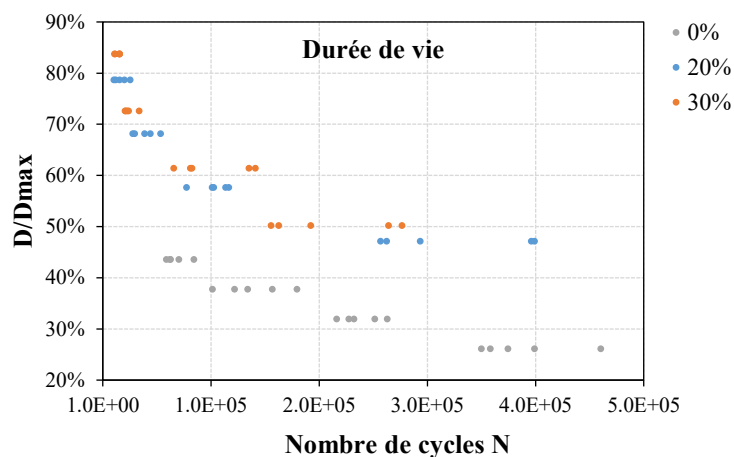


Figure 4.7 : Durées de vies des engrenages biocomposites

Tableau 4.6 : Durées de vie moyennes à chaque niveau d'imposition de déplacements

Engrenages	Durée de vie des biocomposites (en cycles)			
	0.45 mm	0.55 mm	0.65 mm	0.75 mm
Gear 00%	388'269 ±39'657	237'932±16'876	138'588±27'121	67'437±9'093
Gear 20%	321'437±63'317	102'149±13'739	38'518±9'505	16'561±5'428
Gear 30%	210'092±41'188	100'870±30'854	24'279±4'811	13'681±2'116

▪ **Comparaison des durées de vie avec des résultats de la littérature**

Pour les mêmes types d'essai, P. Blais [44] trouve des durées de vies très supérieures à nos résultats. Il étudie le cas des engrenages non renforcés (00% de fibre) et le cas des engrenages renforcés de 40% de fibres de bouleau. Pour un niveau d'imposition de 0.5 mm par exemple, tous les échantillons non renforcés testés par P. Blais atteignent la limite d'endurance, ce qui marque un grand écart avec nos résultats. À 0.45 mm d'imposition, nous trouvons une durée de vie moyenne d'environ $4.0 \text{ E}+05$ cycles.

La seule différence remarquable avec les travaux de P. Blais se situe au niveau de la configuration des essais. En effet, dans les essais de fatigue réalisé par P. Blais, c'est l'échantillon qui en mouvement au cours de l'essai, alors que dans notre configuration, les échantillons restent fixes et c'est l'outil qui se déplace. Cette différence de configuration est non négligeable, car elle implique un transfert d'énergie mécanique vers les échantillons sous forme d'énergie cinétique et potentielle, ce qui peut conduire à une surestimation de la durée de vie des échantillons.

Tableau 4.7 : Comparaison de résultats de durée de vie avec la littérature

Engrenages	Durée de vie des engranges non renforcés (en cycles)			
Gear 00%	0.45 mm	0.55 mm	0.65 mm	0.75 mm
(Nos résultats)	388'269 ±39'657	237'932±16'876	138'588±27'121	67'437±9'093
Gear 00%	0.50 mm	0.60 mm	0.70 mm	0.80 mm
(P. Blais) [44]	L. d'endurance	8.87 E+05	1.92 E+05	1.03 E+0.5

4.3.2 Indices d'endommagements

Les indices d'endommagements transmettent des informations permettant de décrire plus en détail le processus de cycle de vie des échantillons. Ils permettent notamment de suivre l'évolution des propriétés du matériau au cours du cycle de vie des échantillons. Dans les sections qui suivent, seront présentés deux indices d'endommagement notamment l'évolution de la résistance résiduelle et la fissuration des différents échantillons, aux quatre niveaux d'imposition de déplacements fixés. Les courbes des deux indices d'endommagement sont affichées sur un même graphique afin de suivre leur corrélation. La résistance résiduelle est affichée en trait continu et la fissuration en trait interrompu.

a) Engrenages non renforcés : 00% de fibres de bouleau

Les déplacements de 0.45 mm, 0.55 mm, 0.65 mm et 0.75 mm correspondent respectivement à 26%, 32%, 37% et 44% du déplacement maximal en quasi-statique des engrenages non renforcés. À ces niveaux de charge, une fatigue normale (polycyclique avec diminution lente des propriétés du matériau) est observée. L'évolution de la résistance résiduelle et de la fissuration, présentée à la figure 4.8, indique que pour les quatre niveaux de charge, les trois phases de réduction de la résistance résiduelle sont observables : une première rapide (entre 0 - 10 % du cycle de vie), suivie d'une phase sous forme de plateau (entre 10 - 70 % du cycle de vie) puis une troisième rapide menant au bris (entre 70 - 100 % du cycle de vie). Les mesures moyennes relatives à l'initiation de la fissure des échantillons sont présentées dans le tableau 4.8. La nucléation de la fissure survient aux alentours de la moitié du cycle de vie des échantillons, entraînant une réduction de la résistance résiduelle d'environ 50 %. La progression de la macro-fissure se situe donc entre la fin de la deuxième phase de réduction de la résistance résiduelle et la troisième phase. Ainsi, il est possible de conclure que les deux indices d'endommagements sont en corrélation dans leur évolution.

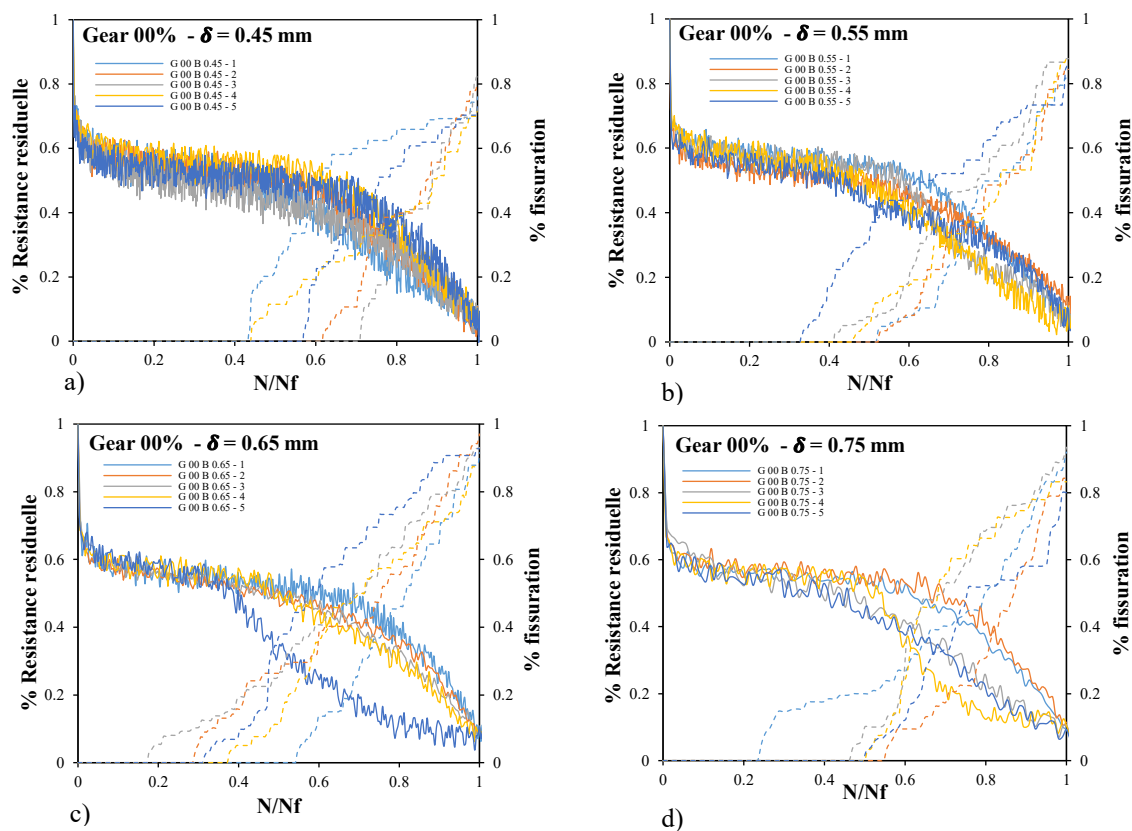


Figure 4.8 : Mesures relatives selon deux indices d'endommagement pour les engrenages non renforcés

Tableau 4.8 : Mesures moyennes relatives à l'initiation de la fissure des engrenages

Déplacement (D/Dmax)	Initiation de la fissure	
	Nombre de cycles (N/N _f)	Résistance résiduelle (%)
0.45 mm (26%)	0.58	0.49
0.55 mm (32%)	0.448	0.538
0.65 mm (37%)	0.334	0.55
0.75 mm (44%)	0.452	0.53

b) Engrenages renforcés de 20% de fibres de bouleau

Les déplacements de 0.45 mm, 0.55 mm, 0.65 mm et 0.75 mm correspondent

respectivement à 47%, 58%, 68% et 78% du déplacement maximal en quasi-statique des engrenages renforcés de 20% de fibre bouleau. Pour ces niveaux de chargements, deux cas sont remarquables : premièrement, les observations faites au cas de 0.45 mm et 0.55 mm (figure 4.13 a et b), sont presque similaires à celles des engrenages non renforcés, en ce qui concerne la réduction de la résistance résiduelle, l'amorçage et l'évolution de la macro-fissuration. La fatigue est considérée comme normale (polycyclique), et les trois phases de réduction de la résistance résiduelle sont observées, montrant également une corrélation avec l'amorçage et l'évolution de la macro-fissuration. Pour les charges de 0.65 mm et 0.75 mm illustrés à la figure 4.13 c) et b), une réduction trop rapide de la résistance résiduelle et de la fissuration est observée. Ces valeurs de charge sont très proches de la limite élastique des biocomposites entraînant la fatigue oligocyclique.

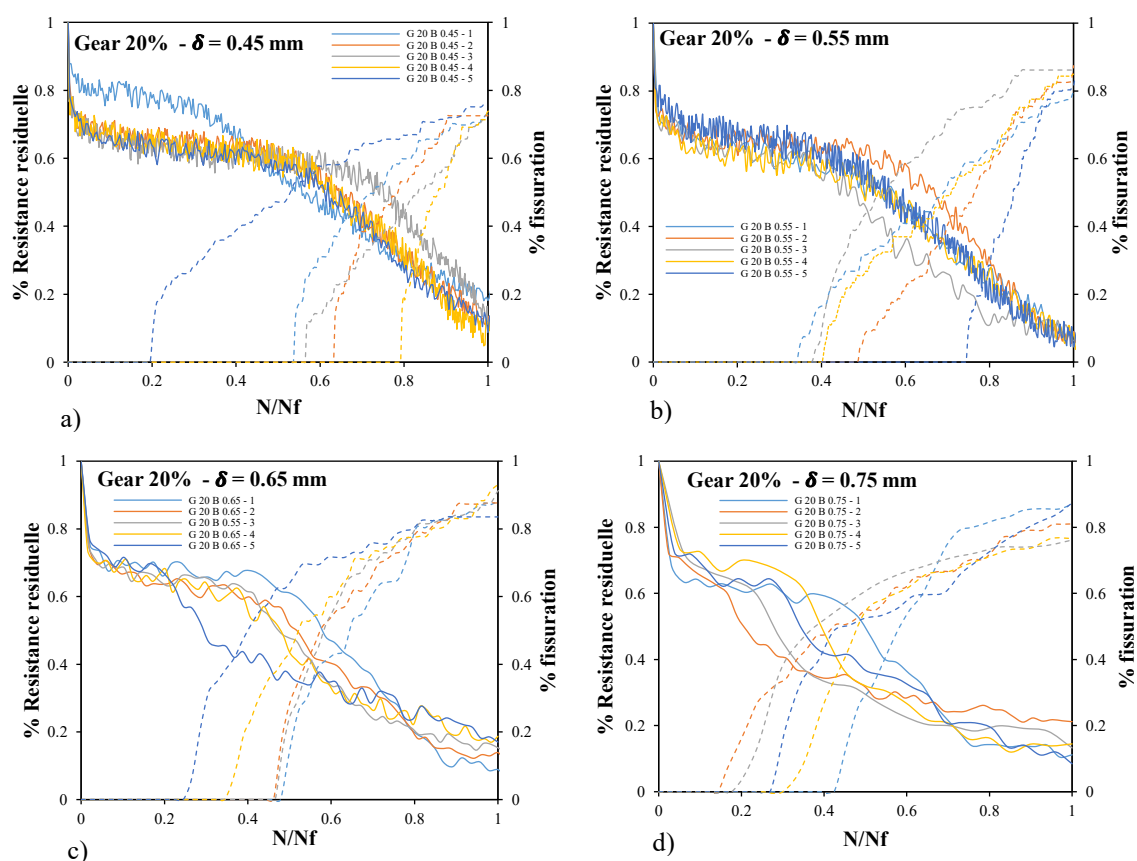


Figure 4.9 : Mesures relatives selon deux indices d'endommagement pour les engrenages biocomposites renforcés de 20% de fibres de bouleau

Tableau 4.9 : Mesures moyennes relatives à l'initiation de la fissure pour les engrenages renforcés de 20% de fibres de bouleau

Déplacement (D/Dmax)	Initiation de la fissure	
	Nombre de cycles (N/N _f)	Résistance résiduelle (%)
0.45 mm (47%)	0.544	0.5
0.55 mm (58%)	0.466	0.536
0.65 mm (68%)	0.402	0.578
0.75 mm (78%)	0.264	0.614

c) Engrenages renforcés de 30% de fibres de bouleau

Les déplacements de 0.45 mm, 0.55 mm, 0.65 mm et 0.75 mm correspondent respectivement à 50%, 61%, 73% et 84% du déplacement maximal en quasi-statique des engrenages renforcés de 30% de fibre bouleau. Les mêmes comportements des indices d'endommagement que ceux observés dans le cas des engrenages renforcés de 20% sont remarque (figure 4.10). Cependant, on constate que l'initiation de la fissure est rapide par rapport à son évolution. Le tableau 4.10 montre que pour les niveaux de déplacements de 0.65 et 0.75 mm la progression de la fissure représente près de 80 % de la durée de vie des biocomposites.

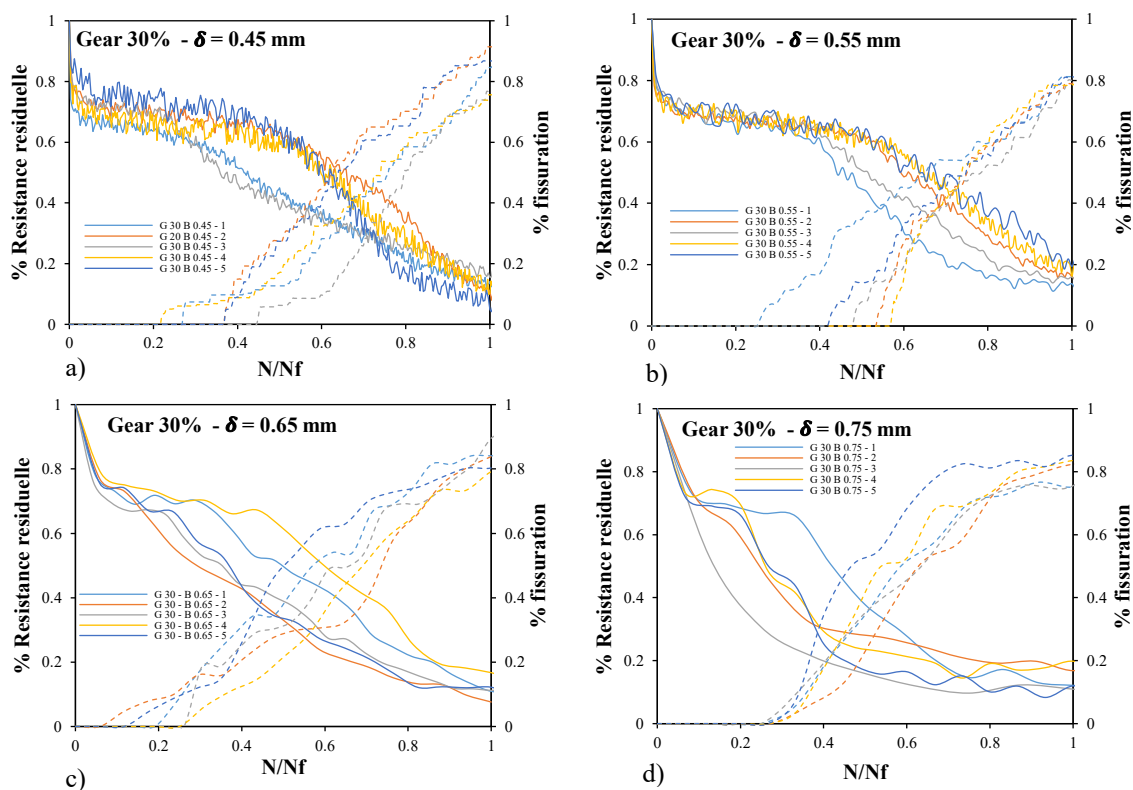


Figure 4.10 : Mesures relatives selon deux indices d'endommagement pour les engrenages biocomposites renforcés de 30% de fibres de bouleau

Tableau 4.10 : Mesures moyennes relatives à l'initiation de la fissure pour les engrenages renforcés de 30% de fibres de bouleau

Déplacement (D/Dmax)	Initiation de la fissure	
	Nombre de cycles (N/N _f)	Résistance résiduelle (%)
0.45 mm (50%)	0.36	0.608
0.55 mm (61%)	0.44	0.584
0.65 mm (73%)	0.182	0.706
0.75 mm (84%)	0.24	0.488

▪ Synthèse et comparaison des résultats des indices d'endommagement

Les durées de vie sont plus longues pour le cas de déplacement de 0.45 mm, ce cas est donc choisi dans cette section, pour établir des comparaisons entre les indices d'endommagement des biocomposites.

La figure 4.13 présente les tendances de l'évolution de la résistance résiduelle et de la fissuration des engrenages renforcés et non renforcés testés. Comme présenté plus haut, les trois phases de réduction de la résistance résiduelle sont observables et sont en corrélation avec l'évolution de la fissure : la fin du plateau des courbes de la résistance résiduelle correspond pratiquement à zone de nucléation de la fissure.

Le tableau 4.11 présente les durées de vie moyenne conduisant à l'initiation de la fissure. Selon les données de ce tableau, la nucléation de la fissure survient plus rapidement pour les engrenages renforcés de 30% de bouleau (à 36% de leur durée de vie) par rapport à ceux renforcés à 20% (à 55%) et aux non renforcés (à 58%). La durée relative de fissuration est donc plus longue pour les engrenages renforcés de 30% de bouleau, représentant ainsi 64 % de leur cycle de vie. Cela peut s'expliquer par le fait que les fibres entraînent un changement constant de direction de la fissure, laquelle cherche à contourner les fibres pour se propager, comme illustré dans la figure 4.12.

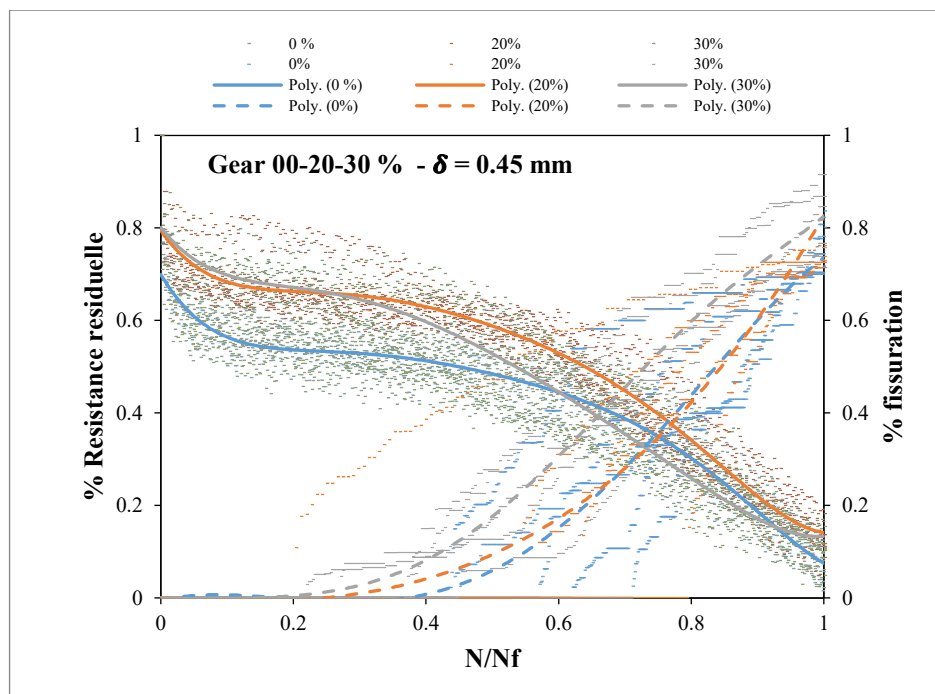


Figure 4.11 : Comparaison des indices d'endommagement des biocomposites

Tableau 4.11 : Nombre de cycle moyen correspondant à l'apparition de la fissure

Initiation de la fissure	Nombre de cycles (N/N _f)	Résistance résiduelle (%)
Gear 00%	0.58	0.49
Gear 20%	0.554	0.50
Gear 30%	0.36	0.608

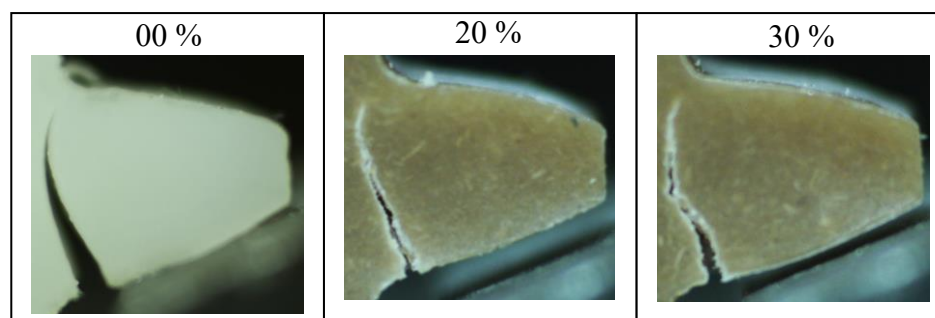


Figure 4.12 : Comparaison des chemins de fissuration des biocomposites

4.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter, d'analyser et d'interpréter les résultats des différentes études menées dans le cadre de notre travail de recherche. Nous avons tout d'abord exposé les résultats de l'étude en statique et puis ceux de l'étude en fatigue.

Les forces (ou contraintes) enregistrées durant les tests quasi-statiques sont inférieures à celles relevées dans la littérature, ceci est dû à la vitesse de 2mm/min que nous avons choisi pour réaliser nos essais. Dans les deux approches présentées (analytique et expérimentale), les résultats ont montré que l'incorporation des fibres de bouleau améliore les propriétés mécaniques des engrenages biocomposites. Bien qu'il existe des variations entre les modèles théoriques et expérimentaux, ces derniers restent assez proches : les modèles théoriques proposés, qui dépendent uniquement de la force et les paramètres géométriques des échantillons, peuvent permettre de prédire le comportement des engrenages biocomposites avant même de les tester expérimentalement.

Les tests en fatigue, réalisés à partir des résultats de l'étude en statique, ont montré des durées de vie inférieures par rapport à celles relevées dans la littérature. Les indices d'endommagement, à savoir la résistance résiduelle et la fissuration, ont été recueillis et comparés pour les trois matériaux utilisés. L'ajout de fibres retarde l'évolution de la fissure, ce qui conduit à une augmentation de la durée de vie des échantillons renforcés.

Chapitre 5 - Conclusion générale et Perspectives

5.1 Récapitulation

Notre recherche s'est focalisée sur l'étude du comportement mécanique des engrenages en biocomposite HDPE/bouleau, avec pour objectif de mieux comprendre leur comportement en flexion, premièrement en statique et ensuite en fatigue. Cette étude vise à promouvoir l'utilisation des composites à fibres naturelles dans des applications structurelles, en particulier dans les systèmes de transmission de puissance mécanique tels que les engrenages à dentures droites.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le contexte de notre étude lié au déclin de l'industrie papetière du Québec et l'opportunité qu'offre les biocomposites thermoplastique/fibre de bois pour relever cette économie. La problématique a été clairement définie et une présentation des objectifs a été établie.

Le deuxième chapitre, nous a permis de passer en revue les travaux existants concernant les matériaux biocomposites et leurs applications dans le domaine des engrenages, nous nous sommes intéressés aux modes d'endommagement des engrenages en plastiques et en biocomposites ; et plus particulièrement au mode d'endommagement par fatigue à la racine de la dent.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté en détail le cadre méthodologique de notre travail de recherche, de la fabrication des échantillons jusqu'à la collecte des données à analyser; nous avons présenté toutes les différentes méthodes, les outils et les équipements utilisés pour atteindre nos objectifs. Nous avons présenté notamment ainsi les tests en quasi statique et de fatigue, ainsi que deux méthodes de quantification de l'endommagement en fatigue.

Le quatrième chapitre, nous a permis de présenter une analyse et une interprétation des résultats des études présentées au chapitre 3. Les résultats des essais en quasi-statique ont été présentés en comparaison avec les résultats d'une étude analytique basée sur plusieurs hypothèses simplificatrices. Ensuite, des résultats de l'étude en fatigue ont

été présentés, en mettant en évidence l'évolution de l'endommagement (la résistance résiduelle et de la fissuration). Les corrélations entre ces deux indices d'endommagement ont été discutées, et les durées de vie des échantillons ont également été présentées.

Le présent chapitre 5 vise à faire une conclusion, en rappelant les résultats importants obtenus dans notre recherche, d'en dégager les limites et de faire des recommandations pour des futurs travaux de recherche

5.2 Conclusion et Perspectives

Dans le cadre de l'étude en statique, les deux approches utilisées notamment l'approche analytique et l'approche expérimentale basée sur la corrélation d'images, nous ont permis d'évaluer les propriétés mécaniques de base du biocomposite, telles que le module de flexion, la raideur, la résistance à la flexion, le déplacement et la déformation élastique max. Les résultats ont montré des fluctuations acceptables entre les deux modèles. L'incorporation de fibres de bouleau dans la matrice HDPE a conduit à une augmentation significative de la raideur et du module de flexion des biocomposites; Ceux renforcés de 40% de fibres de bouleau présentent des propriétés comparables à certains polyamides (PA 6, PA11), ce qui positionne les biocomposites comme des alternatives compétitives aux thermoplastiques techniques traditionnels. De plus cette étude en statique nous a permis d'initier des études en fatigue.

Dans le cadre de l'étude en fatigue, nous avons mené des tests expérimentaux de fatigue sur des engrenages renforcés avec différents pourcentages de fibres de bouleau 20% et 30%, ainsi que sur des engrenages non renforcés; les deux indices d'endommagement utilisés notamment la résistance résiduelle et la fissuration nous ont permis de suivre le processus d'endommagement des engrenages testés pendant leur cycle de vie. Les durées de vie de engrenages en biocomposites ont été mesurées, celles-ci correspondent à une réduction de 90% de la résistance résiduelle. Les résultats ont révélé une amélioration notable de la durée de vie des engrenages biocomposites renforcés,

grâce à la capacité des fibres à retarder la propagation des fissures et l'évolution des deux indices d'endommagement sont en corrélation.

Notre étude offre de nouvelles perspectives pour l'utilisation des composites à fibres naturelles dans des applications mécaniques exigeantes. Elle contribue à une approche plus durable et respectueuse de l'environnement dans la conception de composants mécaniques essentiels. En outre, notre étude a identifié plusieurs axes de recherche futurs pour approfondir la compréhension des composites à fibres naturelles dans les applications d'engrenages. Parmi ces perspectives, il convient :

D'étudier le comportement en statique et en fatigue des engrenages en thermoplastique technique comme le nylon dans des conditions similaires pour permettre des comparaisons directes afin de situer les performances des biocomposites.

D'explorer l'étude de la fatigue de contact sur le flanc des engrenages en biocomposites, ceci permettra de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement dans des conditions de charge réelles.

D'opter pour l'utilisation de procédés de fabrication plus contrôlés, adaptés à une production industrielle. Ceci contribuera à réduire la forte variabilité des résultats lors des essais expérimentaux et permettra d'explorer le plein potentiel des engrenages en biocomposites.

Bibliographie

- [1] Marie-Josée Montminy, « L'industrie du papier: un moteur économique qui s'essouffle », *Le Nouvelliste*, Octobre 2014.
- [2] V. Bourgeois, « La capitale mondiale du papier journal » Edition Cap-aux-Diamants inc, (98), 19-21, 2009.
- [3] « pâtes et papiers pour une industrie moderne et compétitive ». http://www.finances.gouv.qc.ca/documents/Autres/fr/pates_papiers.pdf. Consulté le 6 août 2023
- [4] *Biocomposites ENG*, septembre 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=MwivfHVq1F8>. Consulté le 9 août 2023
- [5] F. Mijiyawa, D. Koffi, B. V. Kokta, et F. Erchiqui, « Formulation and tensile characterization of wood–plastic composites: Polypropylene reinforced by birch and aspen fibers for gear applications », *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 28, n° 12, p. 1675-1692, déc. 2015.
- [6] M. Mejri, L. Toubal, J. C. Cuillère, et V. François, « Fatigue life and residual strength of a short- natural-fiber-reinforced plastic vs Nylon », *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, p. 429-441, févr. 2017.
- [7] A. Bravo, L. Toubal, D. Koffi, et F. Erchiqui, « Gear fatigue life and thermomechanical behavior of novel green and bio-composite materials VS high-performance thermoplastics », *Polym. Test.*, vol. 66, p. 403-414, avr. 2018.
- [8] A. Bravo, D. Koffi, L. Toubal, et F. Erchiqui, « Life and damage mode modeling applied to plastic gears », *Eng. Fail. Anal.*, vol. 58, p. 113-133, déc. 2015.
- [9] P. Blais et L. Toubal, « Single-Gear-Tooth Bending Fatigue of HDPE reinforced with short natural fiber », *Int. J. Fatigue*, vol. 141, p. 105857, déc. 2020.
- [10] B. V. Kokta, R. Chen, C. Daneault, et J. L. Valade, « Use of wood fibers in thermoplastic composites », *Polym. Compos.*, vol. 4, n° 4, p. 229-232, 1983.
- [11] A. D. Beshay, B. V. Kokta, et C. Daneault, « Use of wood fibers in thermoplastic composites II: Polyethylene », *Polym. Compos.*, vol. 6, n° 4, p. 261-271, 1985.
- [12] R. G. Raj, B. V. Kokta, D. Maldas, et C. Daneault, « Use of wood fibers in thermoplastics. VII. The effect of coupling agents in polyethylene–wood fiber composites », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 37, n° 4, p. 1089-1103, 1989.
- [13] P. Blais et L. Toubal, « Fatigue of short-natural-fiber-reinforced high-density polyethylene: Stochastic modeling of single-gear-tooth bending », *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 44, n° 5, p. 1241-1256, 2021.

- [14] K. K. Agbozouhoue, D. Koffi, F. Erchiqui, et S. Barnabé, « ZnO Treatment on Mechanical Behavior of Polyethylene/Yellow Birch Fiber Composites When Exposed to Fungal Wood Rot », *Polymers*, vol. 15, n° 18, Art. n° 18, janv. 2023.
- [15] L. Toubal, D. Koffi, A. Koffi, M. Mejri, A. Bravo, « Évaluation du comportement et de l'endommagement d'un composite thermoplastique renforcé par des fibres courtes de bois », *Congres, Sciences et les technologies mécaniques moteurs du développement durable*, Marrakech, Mai 2018.
- [16] A. Koffi, D. Koffi, et L. Toubal, « Mechanical properties and drop-weight impact performance of injection-molded HDPE/birch fiber composites », *Polym. Test.*, vol. 93, p. 106956, janv. 2021.
- [17] « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », *Techniques de l'Ingénieur*. Consulté le 24 août 2023.
- [18] F. Mijiyawa, « Formulation, caractérisation, modélisation et prévision du comportement thermomécanique des pièces plastiques et composites de fibres de bois : application aux engrenages », Thèse de doctorat Ph.D, Département de génie mécanique, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Janvier 2018.
- [19] D. Panaitescu *et al.*, « Effect of interface in natural fiber-polymer composites », *Rev. Roum. Chim.*, vol. 52, p. 409-414, avr. 2007.
- [20] D. Feldman, « *Plastics technology handbook*, by M. Chanda and S. K. Roy, Marcel Dekker Inc., New York, 1987, 552 pp. », *J. Polym. Sci. Part C Polym. Lett.*, vol. 26, n° 6, p. 275-275, 1988.
- [21] M. Mejri, « Études expérimentale et numérique du comportement en fatigue du polyéthylène haute densité renforcé avec des fibres courtes de bouleau », Thèse de doctorat Ph.D, Département de génie mécanique, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Juin 2019.
- [22] A. Mahrouk, « Étude des performances de tribologie des composites et nanocomposites de fibres naturelles à base de polyéthylène (PE) : application aux engrenages pour l'évaluation des performances énergétiques », *Mémoire de Maitrise*, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, 2019.
- [23] A. J. Bolton, « Natural Fibers for Plastic Reinforcement », *Mater. Technol.*, vol. 9, n° 1-2, p. 12-20, janv. 1994.
- [24] A.Koffi, « Formulation, caractérisation, modélisation et prévision du comportement thermomécanique des pièces plastiques et composites de fibres de bois: application aux engrenages » Thèse de doctorat PhD, Département de génie mécanique, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois Rivières, Janvier 2018.
- [25] C. J. Biermann, Éd., « Preface to the Second Edition », in *Handbook of Pulping and Papermaking (Second Edition)*, San Diego: Academic Press, 1996.

- [26] C. J. Biermann, « 2 - Wood and Fiber Fundamentals », in *Handbook of Pulping and Papermaking (Second Edition)*, C. J. Biermann, Éd., San Diego: Academic Press, 1996, p. 13-54.
- [27] J. Roignant, « Biologie de développement du bois en réponse à des sollicitations mécaniques environnementales » Thèse de doctorat Ph.D, Université Clermont Auvergne, Clémont Ferrand, Juin 2018.
- [28] E.Lacoursiere, « Bouleau » :
<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/bouleau>, Mars 2015
- [29] A. P. Jessome, « Strength and related properties of woods grown in Canada. », Forntek Canada , 2000.
- [30] R. Ross, « Wood handbook: Wood as an engineering material », *FPL-GTR-282*, vol. 282, p. 1, 2021.
- [31] F. Boukhris, « Effet du mode de défibrage du bois de bouleau blanc sur les propriétés des granules énergétiques et des composites bois-polymère » Mémoire de Maitrise, École de génie, Université du Québec à Abitibi-Témiscamingue, Mars 2018.
- [32] M. D. H. Beg et K. L. Pickering, « Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part II: Hygrothermal ageing and its effects », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, n° 9, p. 1565-1571, sept. 2008.
- [33] T. Costa, D. Carvalho, D. Souza, F. Coutinho, J. Pinto, et B. Kokta, « Statistical experimental design and modeling of polypropylene–wood fiber composites », *Polym. Test.*, vol. 19, p. 419-428, juin 2000.
- [34] A. Bravo, L. Toubal, D. Koffi, et F. Erchiqui, « Damage Characterization of Bio and Green Polyethylene–Birch Composites under Creep and Cyclic Testing with Multivariable Acoustic Emissions », *Materials*, vol. 8, n° 11, Art. n° 11, nov. 2015.
- [35] F. Hugot et G. Cazaurang, « Mechanical properties of an extruded wood plastic composite », *Mech. Ind.*, vol. 10, n° 6, p. 519-524, nov. 2009.
- [36] F. Ansari, L. A. Granda, R. Joffe, L. A. Berglund, et F. Vilaseca, « Experimental evaluation of anisotropy in injection molded polypropylene/wood fiber biocomposites », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 96, p. 147-154, mai 2017.
- [37] S.-J. Kim, J.-B. Moon, G.-H. Kim, et C.-S. Ha, « Mechanical properties of polypropylene/natural fiber composites: Comparison of wood fiber and cotton fiber », *Polym. Test.*, vol. 27, n° 7, p. 801-806, oct. 2008.
- [38] M. C. N. Yemele, A. Koubaa, A. Cloutier, P. Soulounganga, et M. Wolcott, « Effect of bark fiber content and size on the mechanical properties of bark/HDPE

- composites », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, n° 1, p. 131-137, janv. 2010.
- [39] K. Nasri, L. Toubal, É. Loranger, et D. Koffi, « Influence of UV irradiation on mechanical properties and drop-weight impact performance of polypropylene biocomposites reinforced with short flax and pine fibers », *Compos. Part C Open Access*, vol. 9, p. 100296, oct. 2022.
- [40] D. Koffi, A. Bravo, L. Toubal, et F. Erchiqui, « Optimized use of cooling holes to decrease the amount of thermal damage on a plastic gear tooth », *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, n° 5, p. 1687814016638824, mai 2016.
- [41] Z. Lu, Z. Li, H. Liu, P. Wei, B. Xia, et M. Ye, « An accelerated fatigue test method of polymer gears based on thermostress conversion relation », *Eng. Fract. Mech.*, vol. 266, p. 108388, mai 2022.
- [42] D. Zorko, J. Tavčar, M. Bizjak, R. Šturm, et Z. Bergant, « High cycle fatigue behaviour of autoclave-cured woven carbon fibre-reinforced polymer composite gears », *Polym. Test.*, vol. 102, p. 107339, oct. 2021.
- [43] H. Nouri, « Modélisation et identification de lois de comportement avec endommagement en fatigue polycyclique de matériaux composite a matrice thermoplastique » Thèse de doctorat Ph.D, Sciences des métiers de l'ingénieur, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, juin 2009.
- [44] P. Blais, « Approche stochastique de l'endommagement en fatigue d'engrenages en composite renforcé avec des fibres de bouleaux » Mémoire de Maitrise, Département de génie mécanique, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, 2019.
- [45] P. J. L. Fernandes, « Tooth bending fatigue failures in gears », *Eng. Fail. Anal.*, vol. 3, n° 3, p. 219-225, sept. 1996.
- [46] G.Drouin, M.Gou, P.Thiry, R.Vinet, *Eléments de machines 2e édition*, presses internationales polytechnique, Montréal, 2006.
- [47] J-L. Fanchon, « Guide des sciences et technologies industrielles », Nathan, Edition 2020-2021
- [48] D. Koffi, « Matériaux plastiques et composites ; usage et défis de prototypage virtuel et l'amélioration numérique des pieces mécaniques : cas des engrenages » Orizonturi Universitre, p. 10-48. 2006.
- [49] VDI 2545 - Gear wheels made from thermoplastics, VDI-Gesellschaft Materials Engineering, 1981.

Annexes

6.1 Annexe 1 : Caractéristiques géométriques de la roue dentée : Calcul de L, F

Module m (en mm)	2.54
Nombre de dents	30
Angle de pression α (en °)	20
Largeur de l'engrenage b (en mm)	6.5
Pas diamétral P (en po^{-1})	10
Rapport de transmission	1
Diamètre de tête d_e (en mm)	81.28
Diamètre primitif D_p (en mm)	76.2
Diamètre de pied D_2 (en mm)	69.85
Épaisseur de la dent au cercle primitif t_p (en mm)	4
Creux h_f (en mm)	3.175

- Calcul de L

L est la distance du point d'application de la charge à l'encastrement ; ce qui correspond à la hauteur de la dent

$$L = 2.25 m = 2.25 \times 2.54 = 5.715 \text{ mm} ; \quad L = \mathbf{5.715 \text{ mm}}$$

- Calcul de F

F est la largeur de la dent , $F = b = 6.5 \text{ mm} ; F = \mathbf{6.5 \text{ mm}}$

Annexe 2 : Facteur de forme de Lewis Y en fonction du nombre de dents et de l'angle de pression pour les engrenages plastiques [48]

LEWIS FORM FACTORY <i>Used when tangential tooth loading is calculated at the pitch point</i>		
Number of teeth	20° full depth	20° stub
12	0.415	0.502
13	0.442	0.524
14	0.468	0.540
15	0.490	0.565
16	0.500	0.577
17	0.512	0.588
18	0.520	0.605
19	0.533	0.617
20	0.544	0.626
21	0.551	0.640
22	0.557	0.646
24	0.571	0.665
26	0.587	0.677
28	0.595	0.687
30	0.605	0.697
34	0.629	0.712
38	0.650	0.730
43	0.671	0.738
50	0.696	0.756
60	0.712	0.775
75	0.734	0.791
100	0.758	0.807
150	0.780	0.832
300	0.802	0.854
Rack	0.824	0.882

Annexe 3 : Programme Python pour les résistances résiduelles

```

# Chargement des modules (Librairie disponible en ligne)
import pandas as pd
#Panda: Librairie python disponible dans Anaconda (en ligne) permettant de manipuler les tableaux
import numpy as np
#numpy: Librairie python disponible dans Anaconda (en ligne) permettant de faire des calculs matriciel
import os
#os: interagir avec les systèmes de mon Pc

# module disponible en ligne permettant d'ouvrir le fichier text
from tkinter import filedialog
from tkinter import *

# Chargement du fichier
root = Tk()
root.filename = filedialog.askopenfilename(initialdir = "/",title = "Select file") Button(root, text="Quit", command=root.destroy).pack()
root.mainloop()

#Je récupère le fichier et je dis à panda de lire le fichier tout en sachant que les colonnes sont séparées par une tab
df= pd.read_csv(root.filename, sep="\t",low_memory=False)

# Afficher les 05 premières lignes du tableau
df.head()

# Afficher la taille du tableau
df.shape

# Supprimer la première ligne
data_cycle = df[1:]

data_cycle.columns

#Afficher à nouveau les 05 premières lignes
data_cycle.head()

#Reconnaître les valeurs de la colonne Axial Dis. comme "float" et les mettre celles-ci en valeurs absolues
data_cycle['Axial Displacement '] = np.abs(data_cycle['Axial Displacement ']).astype(float)

```

```

# Grouper Les données en chaque cycle, et pour chaque cycle retenir la valeur
max
data_cycle = data_cycle[data_cycle.groupby('CycleCount')['Axial Displacement
'].transform('max') == data_cycle['Axial Displacement ']]

#multiplier la valeur max par le (-)

data_cycle['Axial Displacement '] = - data_cycle['Axial Displacement ']

data_cycle.head()

# Demande l'entrée du pas de saut
step = int(input("Entrer l'intervalle d'enregistrement : "))

# une liste contenant les pas
row_, col_ = data_cycle.shape
list_cut = [i for i in range(0, row_, step)]

Arranger les indices pour le filtre
data_cycle = data_cycle.reset_index().iloc[:,1:]

# afficher les 5 premières lignes pour confirmer la modification des indices
data_cycle.head()

# filtrer par step contenu dans la liste
data_cycle = data_cycle[data_cycle.index.isin(list_cut)]

# afficher le tableau pour confirmer les valeurs attendues
data_cycle

#créer au bureau (ts créer permet de ne différencier mes différents fichier
Excel automatique)

from datetime import datetime
ts = datetime.timestamp(datetime.now())
pt =
os.path.expanduser(f"~/Desktop/Cycle_{ts}.xlsx")
data_cycle.to_excel(pt)

```