

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE  
CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE

PAR  
Samlani Rachid

Évaluation du comportement mécanique d'une dent d'engrenage en bio  
composite

Mars 2019

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## **Avant-propos.**

Ce travail s'inscrit dans une nouvelle dynamique liée à l'intérêt et l'utilisation accrue des fibres naturelles dans la mise en œuvre de nouvelles pièces en composites. De nos jours, une grande sensibilisation à l'environnement a contribué à augmenter l'usage de ces fibres naturelles comme renfort dans les composites. Ce tournant permettra de diminuer l'effet de la croissance de nos besoins sur l'environnement. Compte tenu des difficultés actuelles de l'industrie papetière au Québec, les entreprises forestières cherchent à trouver de nouveaux débouchés autres que le papier. Ainsi, des activités de recherche liées au développement de matériaux écologiques deviennent un élément clef pour la croissance de l'industrie verte à l'échelle régionale.

## Résumé

L'utilisation de matériaux composites à fibres synthétiques soulève de plus en plus de questions tant au niveau de la santé-sécurité au travail qu'environnemental. L'ingénieur qui conçoit un appareil est aujourd'hui amené à vérifier non seulement son dimensionnement d'un point de vue statique et dynamique, mais il doit prendre en considération des normes environnementales de plus en plus sévères. Une alternative consiste à développer des matériaux biocomposites, recyclables et biodégradables en fin de vie, avec des propriétés mécaniques élevées et un impact environnemental faible. Toutefois, l'optimisation des propriétés élastiques de ces biomatériaux et l'étude de leurs modes d'endommagement sont des étapes nécessaires pour une utilisation fiable et sécuritaire.

Dans cette thèse on s'intéresse à un biocomposite à matrice thermoplastique polyéthylène (HDPE) renforcée par des fibres naturelles courtes (bouleau). Ce travail fait partie d'un programme de recherche (Des éco-composites thermoplastique-fibres naturelles pour des éléments de machine) qui a comme objectif de présenter une nouvelle génération d'éléments de machines (dans notre cas des engrenages) en utilisant des composites à fibres naturelles. Dans la réalité, les dents des engrenages sont constamment soumises à d'importants efforts en flexion et en contact. L'évaluation de la déformation d'une dent d'engrenage présente une problématique liée à la difficulté d'installer des jauges

de déformation sur le flanc d'une dent. Pour pallier à cette difficulté, nous avons utilisé une méthode d'évaluation du déplacement et la déformation sans contact basée sur la corrélation d'image. De plus, nous avons étudié l'effet du pourcentage des fibres et de la température sur le comportement à la rupture du matériau de l'étude en respectant la norme ASTM D256 - 10e1. Les résultats expérimentaux des propriétés mécaniques obtenues sont comparés à ceux trouvés dans la littérature. Ces mesures ont permis une meilleure compréhension du comportement de nos matériaux et surtout l'amélioration et la validation de leurs procédés de fabrication.

## **Remerciements**

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de recherche qui m'a mis à disposition tout ce que dont j'avais besoin pour réussir mon travail de recherche.

Je remercie aussi l'ingénieur du laboratoire de génie mécanique Jonathan saint Arnaud et le technicien Dany Lemay, l'étudiant en maîtrise Philippe Blais pour sa collaboration et aussi les étudiants en doctorat Koffi et Mehdi Mejri pour leur collaboration.

Finalement je remercie spécialement ma famille pour leur soutien pendant toute la durée de mes études.

# Table des matières

Liste des abréviations et symboles :	11
Chapitre 1 : Introduction générale	13
1.1 Introduction :	14
1.2 Problématique :	16
1.3 Objectifs	17
Chapitre 2 : Revue bibliographique	18
Introduction :	19
2.1 Fibres :	19
2.1.1 Structure d'une fibre végétale :	21
2.1.2 Fibres de bois :	21
2.1.3 Facteurs influençant les fibres naturelles :	22
2.2 Composite thermoplastique à fibres naturelles :	23
2.2.1 Matrice thermoplastique :	24
2.2.2 Additifs :	24
2.2.3 Propriétés mécaniques des composites thermoplastiques / fibre de bois :	24
2.3. Essais d'impact :	28
2.3.1 La résilience :	28
2.3.2 Différence entre essai Charpy et essai Izod :	29
2.3.3 Essai Izod	30
2.3.4 Calcul de la résistance au choc Izod :	30
2.3.5 Effet de la température et la pression de serrage sur les résultats des essais Izod :	30
2.3.6 Résistance au choc des composites thermoplastiques/ fibres de bois :	32
2.4 Travaux sur les essais de flexion sur les dents d'engrenages :	32
2.4.1 Différentes méthodes des essais de flexion :	32
2.4.2 Calcul de la résistance en flexion	34
2.5 Méthode de corrélation par images :	35
Conclusion :	36
Chapitre 3 : Essais Izod	38
Introduction :	39
3.1. Fabrication :	39
3.1.1 Matériau :	39

3.1.3 Usinage des éprouvettes Izod :	41
3.2 Essai Izod :	42
3.3. Résultats et interprétation :	43
3.3.1 Pourcentage de fibres et agent de couplage :	44
3.3.2. Température :	45
Conclusion :	46
Chapitre 4 : Essais de flexion sur les dents des engrenages	47
Introduction :	48
4.1. Fabrication :	48
4.1.1 Fabrication de la pâte et moulage des engrenages :	48
4.1.2 Usinage des engrenages :	48
4.2. Matériel :	49
4.2.1. Banc d'essai de flexion :	49
4.2.2 Camera CCD :	51
4.2.3 Machine de traction :	51
4.3. Design expérimental :	52
4.4. Résultats et interprétation :	54
4.4.1. Courbes contraintes déformation :	54
4.4.2 Cartographies de déformation :	60
Conclusion :	62
Chapitre 5 : Conclusion générale	64
Conclusion générale :	65
Liste des références :	67
ANNEXES	72



## Liste des figures :

Figure 1: Évolution de la nature du matériau des engrenages au cours du temps	15
Figure 2: Pyramide des matériaux plastiques [1]	16
Figure 3: Catégorie des fibres naturelles [2,3,4]	20
Figure 4: Différentes catégories des fibres végétales [11 ]	21
Figure 5: Structure d'une trachéide [12 ]	22
Figure 6: Diamètres au long d'une fibre de lin [14]	23
Figure 7: Différentes catégories de composites [4,15]	23
Figure 8: Comparaison des propriétés mécaniques du HDPE avec 40% de fibres et le nylon [ 20 ]	25
Figure 9: Module de traction et déformation à la rupture pour différents pourcentages de fibres [21]	26
Figure 10: propriétés mécaniques du HDPE et NHDPE pour différents pourcentages de fibres avec et sans agent de couplage tiré de [22]	26
Figure 11: Dimensions d'une fibre	27
Figure 12: Différence entre essai Izod et Charpy	29
Figure 13 : Dimensions de l'éprouvette selon la norme Izod	30
Figure 14 : Effet de la température sur la résistance au choc [31]	31
Figure 15: Effet de la pression de serrage sur la résistance au choc pour différentes température [31]	31
Figure 16: Force sur une dent d'engrenage sollicitée en flexion [36]	33
Figure 17: essai de flexion à trois points sur une dent d'engrenage [ 37 ]	33
Figure 18 : Test de flexion sur une dent d'engrenage selon la norme SAEJS1619 tiré de [ 38 ]	34
Figure 19: image d'un test flexion prise par la CCD	35
Figure 20: Principe de la corrélation d'images [40]	36
Figure 21: Constituants du composite	40
Figure 22: mélangeur de marque brebender	40
Figure 23: Presse hydraulique	41
Figure 24: L'opération d'usinage à l'aide d'une scie	41
Figure 25: Dispositif pour créer une entaille en v:	42
Figure 26: Machine d'essais pour Izod et Charpy	43
Figure 27 : énergie moyenne dissipée pour chaque pourcentage de fibres	44
Figure 28: Résistance au choc pour différentes températures	45

Figure 29: Usinage d'un trou au milieu de l'engrenage	49
Figure 30: Banc d'essai	50
Figure 31: Composantes du banc d'essai	50
Figure 32: Caméras CCD	51
Figure 33: Banc d'essai installé sur la machine de traction	52
Figure 34: Image CCD de la rupture d'une dent lors d'un test en flexion	53
Figure 35: Courbes contrainte-déformation pour le cas de 0% de fibres	54
Figure 36: Courbes contrainte-déformation pour le cas de 20% de fibres	56
Figure 37: Courbes contrainte-déformation pour le cas de 40% de fibres	58
Figure 38: Histogramme des modules de flexion par rapport aux pourcentages de fibres	60
Figure 39: Cartographie des champs de déformation de la partie élastique pour le cas de 40 %	61
Figure 40: Cartographie des champs de déformation de la partie plastique pour le cas de 40 %	61
Figure 41: Cartographie des champs de déformation juste avant la rupture de la dent pour le cas de 40 %	62
Figure 42: énergies dissipées dans le cas de 0 % de fibres	72
Figure 43 : énergies dissipées dans le cas de 10 % de fibres	73
Figure 44 : énergies dissipées dans le cas de 20 % de fibres	75
Figure 45 : énergies dissipées dans le cas de 30 % de fibres	77
Figure 46 : énergies dissipées dans le cas de 40 % de fibres	79
Figure 47: énergie dissipée pour 40 % de fibres à température ambiante	81
Figure 48: énergie dissipée pour 40 % de fibres à 0 degré	82
Figure 49: énergie dissipée pour 40 % de fibres à -10 degré	83
Figure 50: Courbes force-déformation pour les tests de flexion pour le cas de 0 %	84
Figure 51: Courbes force-déformation pour les tests de flexion pour le cas de 20 %	85
Figure 52: Courbes force-déformation pour les tests de flexion pour le cas de 40 %	86

## Liste des tableaux

Tableau 1: Avantages et inconvénient des fibres végétales [5,6,7,8,9]	20
Tableau 2: Propriétés mécaniques pour différents rapports de forme [25]	28
Tableau 3: Propriétés mécanique de quelques composites thermoplastiques	28
Tableau 4: Résistance au choc pour différents composites thermoplastiques renforcés avec des fibres de bois	32
Tableau 5: Moyennes et écarts types des tests Izod pour les différents pourcentages de fibres	45
Tableau 6: résistance au choc pour différentes températures à 40 % de fibres avec agent de couplage	46
Tableau 7: Résultats des essais de flexion pour le cas de 0% de fibres	55
Tableau 8: Résultats des essais de flexion pour le cas de 40% de fibres	57
Tableau 9: Résultats des essais de flexion pour le cas de 40% de fibres	58

## Liste des abréviations et symboles :

1E0d1 : dent 1 du premier engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

1E0d2 : dent 2 du premier engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

1E0d3 : dent 3 du premier engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

2E0d1 : dent 1 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

2E0d2 : dent 2 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

2E0d3 : dent 3 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

3E0d1 : dent 1 du troisième engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

3E0d2 : dent 2 du troisième engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

3E0d3 : dent 3 du troisième engrenage avec un pourcentage de 0% de fibres.

1E20d1 : dent 1 du premier engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

1E20d2 : dent 2 du premier engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

1E20d3 : dent 3 du premier engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

2E20d1 : dent 1 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

2E20d2 : dent 2 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

2E20d3 : dent 3 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

3E20d1 : dent 1 du troisième engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

3E20d2 : dent 2 du troisième engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

3E20d3 : dent 3 du troisième engrenage avec un pourcentage de 20% de fibres.

1E40d1 : dent 1 du premier engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

1E40d2 : dent 2 du premier engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

1E40d3 : dent 3 du premier engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

2E40d1 : dent 1 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

2E40d2 : dent 2 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

2E40d3 : dent 3 du deuxième engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

3E40d1 : dent 1 du troisième engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

3E40d2 : dent 2 du troisième engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

3E40d3 : dent 3 du troisième engrenage avec un pourcentage de 40% de fibres.

$\sigma_{max}$  : Résistance maximale de flexion à la racine de la dent en MPa.

$F_{max}$  : Force maximale en N.

AC : Agent de coulage.

HDPE : Polyéthylène haute densité

Izod : Test standardisé pour évaluer la résistance au choc (ASTMD 256)

## **Chapitre 1 : Introduction générale**

## 1.1 Introduction :

De nos jours, une grande sensibilisation à l'environnement a contribué à augmenter l'usage des fibres naturelles comme renfort dans les matériaux composites. En plus d'être biodégradables et écologiques, les composites à fibres naturelles (CFN) présentent des propriétés mécaniques susceptibles de répondre aux exigences industrielles et donc de concurrencer des matériaux non dégradables dans plusieurs domaines d'application. Les bio composites représentent de nombreux avantages puisqu'ils sont moins nuisibles pour l'environnement, tout en représentant un bon rapport propriété/densité et sont moins coûteux que plusieurs matériaux plastiques techniques disponibles sur le marché actuellement. Ceci a encouragé plusieurs chercheurs et industriels à s'intéresser au développement et l'étude du comportement de ces matériaux.

Dans cette thèse on s'intéresse à un biocomposite à matrice thermoplastique polyéthylène (HDPE) renforcée par des fibres naturelles courtes (bouleau). Ce projet s'inscrit dans l'un des objectifs du Centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques (CRML) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (Des éco-composites thermoplastique-fibres naturelles pour des éléments de machine) qui a comme objectif de concevoir et fabriquer des composites à base de matériaux lignocellulosiques, afin de contribuer à une efficience accrue du développement de cette industrie au Québec.

Les avantages majeurs de l'utilisation des engrenages en biocomposite sont essentiellement leur aptitude à fonctionner sans lubrifiant externe, mais aussi le

faible coût de mise en œuvre, joints à leurs propriétés intrinsèques exclusives, notamment l'absorption des chocs et des vibrations permettent aux engrenages en plastique et biocomposite de s'imposer dans les applications telles que les articles électroménagers et les équipements de bureau. La figure 1, présente une synthèse de l'évolution des matériaux utilisés dans la confection des engrenages.

Le bois était le premier matériau utilisé dans la confection des engrenages depuis plus que 3000 ans avant notre ère. Ensuite, l'engrenage métallique se généralise au XVII<sup>e</sup> siècle dans la petite mécanique et l'horlogerie. Après l'invention en 1930 de la première matière plastique dérivée du pétrole, les engrenages en plastique voient le jour.

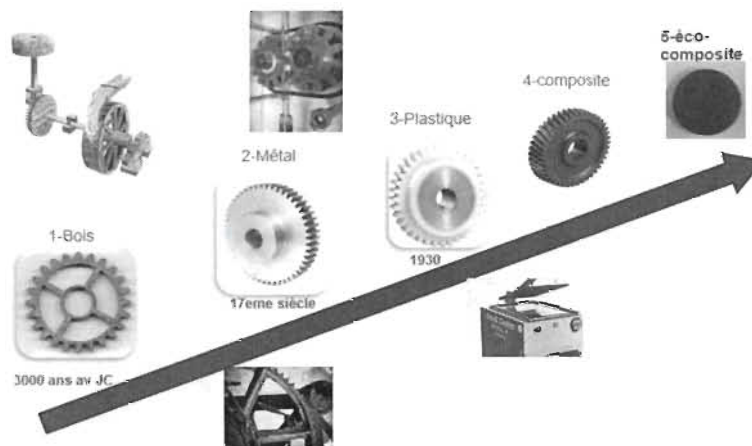


Figure 1: Évolution de la nature du matériau des engrenages au cours du temps



## 1.2 Problématique :

Les biocomposites offrent un bon rapport propriété/densité avec un faible impact environnemental. Mais, leurs utilisations restent limitées aux applications non structurelles. Les engrenages jouent un rôle-clé dans de nombreux systèmes de transmission de puissance. Leur rupture peut finalement provoquer la défaillance d'un grand nombre de systèmes mécaniques. Ainsi, l'utilisation d'un biocomposite dans ce domaine doit se faire de manière pertinente.

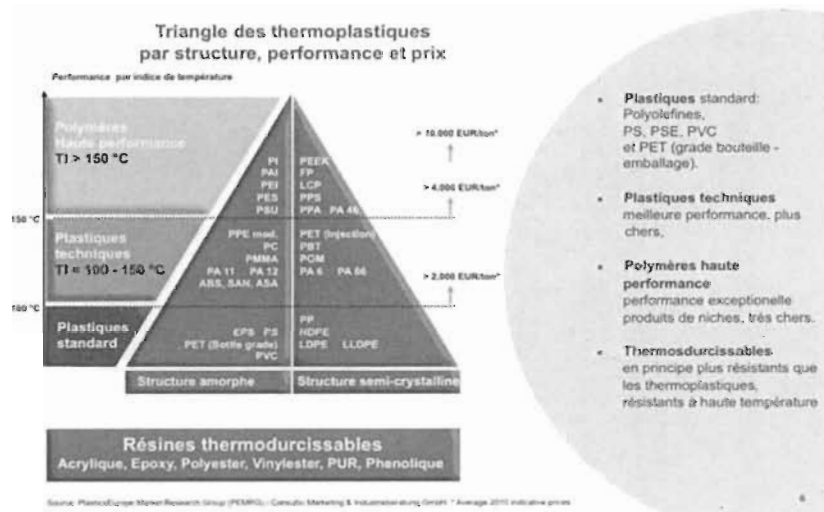


Figure 2: Pyramide des matériaux plastiques [1]

Les dents des engrenages sont constamment soumises à d'importants efforts en flexion et en contact. L'estimation des propriétés mécaniques à l'échelle de la dent et l'énergie de rupture à l'échelle de l'éprouvette deviennent une tâche très importante pour une utilisation optimisée de ces engrenages de nouvelles générations. L'évaluation de la déformation d'une dent d'engrenage présente une problématique liée à la difficulté d'installer des jauges de déformation sur le flanc d'une dent. De plus, l'énergie de rupture sous impact (Izod) de notre

matériau comparé à des thermoplastiques techniques n'a pas été encore étudiée. La problématique demeure donc de déterminer le comportement sous une sollicitation statique (flexion) d'une dent d'un pignon en biocomposite et son mode de défaillance par choc sur des éprouvettes Izod.

### **1.3 Objectifs :**

L'objectif principal de cette maîtrise est d'étudier le comportement en statique d'une dent d'engrenage en biocomposite.

Ce projet vise :

- La mise en œuvre de roues dentées fiables de composites de fibres naturelles ;
- La réalisation des essais de flexion sur des dents d'engrenage ;
- L'étude de la tendance du matériau à résister à un choc brutal.

L'organisation du travail sera présentée dans les lignes suivantes. Le Chapitre II portera sur la revue de la littérature. Dans le Chapitre III, nous expliquerons les méthodologies mises en œuvre dans le travail et les résultats des essais de rupture par Choc. Dans le Chapitre IV, nous décrirons les méthodologies et les résultats des essais de flexion. Finalement, nous terminerons ce mémoire par le Chapitre V qui présentera les conclusions, les limitations ainsi que les perspectives de ce travail.

## **Chapitre 2 : Revue bibliographique**

## Introduction :

Dans ce deuxième chapitre, nous présenterons la revue de littérature qui mettra les projecteurs sur quatre axes, à savoir : le matériau étudié et le recensement des travaux déjà effectués ; les essais de résilience de type Izod ; les différentes méthodes des essais de flexion ainsi que l'approche mathématique permettant de calculer la contrainte de flexion dans une dent d'engrenage ; et enfin la technique de corrélation d'images sera présentée.

## 2. Matériau :

Dans ce travail, un matériau biocomposite est développé avec des fibres de bois de l'industrie papetière (bouleau) mélangées avec une matrice thermoplastique de polyéthylène (HDPE). Le bouleau est un arbre feuillu commun qui pousse dans les régions froides où les précipitations sont abondantes. La province du Québec abrite environ 50 pour cent du volume de bois du bouleau jaune en Amérique du Nord.

### 2.1 Fibres :

Les fibres naturelles sont utilisées depuis des siècles par les civilisations antérieures. Durant les dernières années, les chercheurs et les industriels se sont penchés sur l'étude et le développement de matériaux composites à base de fibres naturelles.

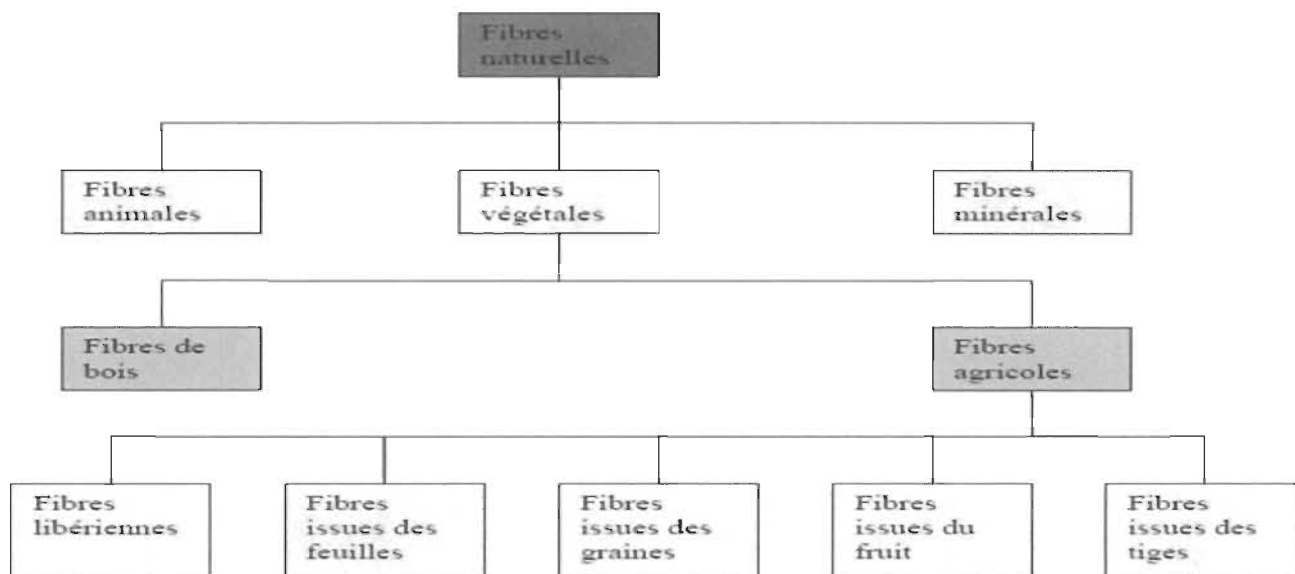


Figure 3: Catégorie des fibres naturelles [2,3,4]

Les fibres naturelles se divisent en plusieurs catégories : fibres animales, fibres végétales et fibres minérales (Figure 3). Dans notre étude, nous nous intéresserons aux fibres végétales et plus spécialement aux fibres de bois. Les fibres végétales présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux fibres synthétiques.

Tableau 1: Avantages et inconvénients des fibres végétales [5,6,7,8,9]

Avantages	Inconvénients
Faible poids	Absorption de l'eau
Prix abordable	Variabilité de qualité
Recyclable	Faible tenue thermique
Bonnes propriétés mécaniques	

### 2.1.1 Structure d'une fibre végétale :

Les fibres végétales sont des structures très complexes qui regroupent trois éléments : la lignine, l'hémicelluloses et la cellulose [10]. Le pourcentage de ces composantes varie selon les fibres végétales. Il y a plusieurs sortes de fibres végétales : pailles, feuilles, tiges, fruit et bois (figure 4).

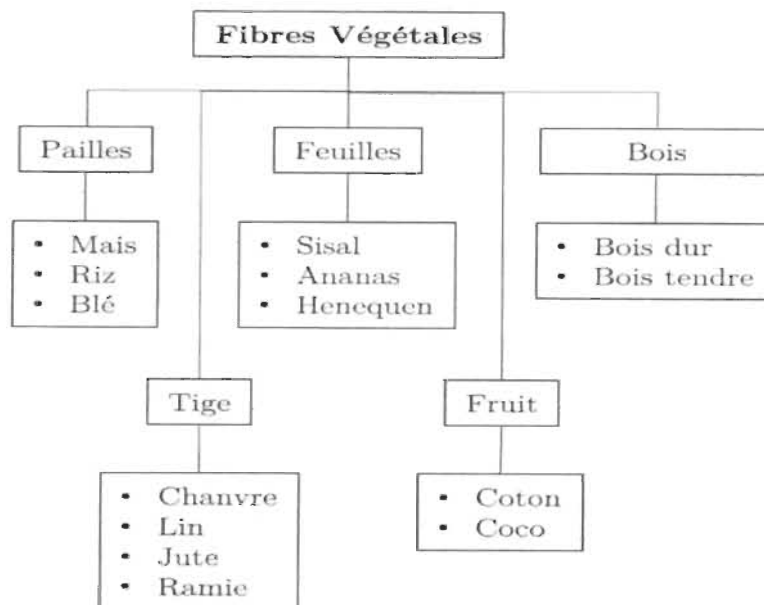


Figure 4: Différentes catégories des fibres végétales [11]

### 2.1.2 Fibres de bois :

La fibre élémentaire de bois est constituée de plusieurs parois : la paroi primaire, la paroi secondaire (S1 à S3) et le lumen (Figure 5).

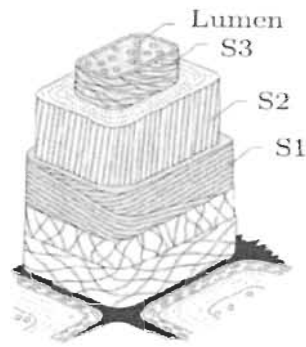


Figure 5: Structure d'une trachéide [12]

### 2.1.3 Facteurs influençant les fibres naturelles :

Dans la revue de littérature, on remarque qu'il y a un écart entre les valeurs des propriétés mécaniques des fibres naturelles. Parmi les causes de cet écart, on trouve les techniques de culture, d'extraction ou de séparation. Les travaux des auteurs suivants : Duval *et al.*, Tazi *et al.*, Saheb *et al.*, Bos *et al.*, Agarwal *et al.*, [8,13], ont démontré que les fibres de lin qui se situent au milieu de la tige présentent de meilleures propriétés mécaniques et physiques que celles qui se situent en bas. Les dimensions des fibres sont aussi un facteur à prendre en considération, étant donné qu'elles varient fortement tout le long d'une fibre. La variation est située entre 10 et 50 micromètres, ce qui peut avoir un impact significatif sur les propriétés mécaniques (Figure 6) des fibres.

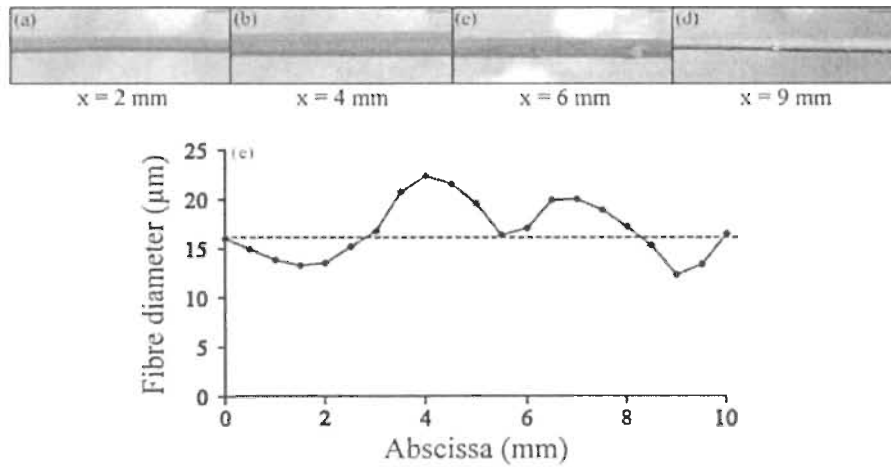


Figure 6: Diamètres le long d'une fibre de lin [14]

## 2.2 Composite thermoplastique à fibres naturelles :

Un matériau composite est un matériau qui consiste à combiner au moins deux matériaux pour avoir des propriétés plus intéressantes. On peut ajouter aussi des additifs pour avoir une bonne compatibilité entre les deux principaux constituants du matériau composite.

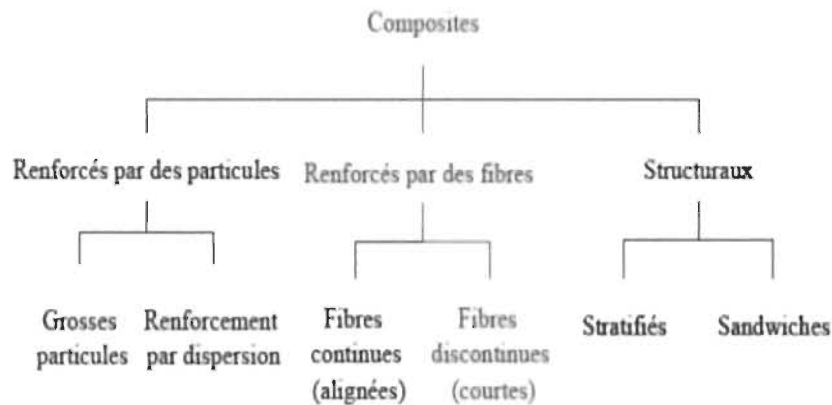


Figure 7: Différentes catégories de composites [4, 15]



Il existe plusieurs sortes de composites : composites renforcés par des particules, composites renforcés par des fibres et composites structuraux, etc. Dans notre travail, nous nous intéresserons plus particulièrement aux composites avec une matrice thermoplastique renforcée par des fibres courtes de bois (Figure 7).

#### 2.2.1 Matrice thermoplastique :

Les Polymères thermoplastiques sont de plus en plus utilisés dans l'industrie manufacturière, surtout dans le secteur de l'emballage et du conditionnement. Le polyéthylène et le propylène sont les thermoplastiques les plus utilisés étant donné que leur prix est très bas. De plus, ils comportent de bonnes propriétés mécaniques et sont recyclables [16, 17,18].

#### 2.2.2 Additifs :

Les matériaux composites se composent essentiellement d'une matrice et un renfort mais on peut ajouter aussi des additifs qui viendront améliorer le composite soit en lui procurant une bonne adhésion entre la fibre et la matrice ou un prix de revient plus faible etc.

Dans notre cas nous avons utilisé le MAP pour étudier son effet sur le composite étudié face à des sollicitations en flexion pour le cas des dents d'engrenages et face aux chocs.

#### 2.2.3 Propriétés mécaniques des composites thermoplastiques / fibre de bois :

Plusieurs travaux se sont penchés sur l'étude des propriétés mécaniques des composites bois-thermoplastique renforcés par des fibres courtes.

Les chercheurs ont alors réussi à démontrer que le composite à base de polyéthylène haute densité (HDPE) renforcé par des fibres courtes de bouleau (FCB) peut avoir les mêmes propriétés mécaniques que les thermoplastiques techniques (Polyamide) couramment utilisés dans la fabrication des engrenages [20]. À titre d'exemple, une comparaison (figure 8) montre que le polyéthylène renforcé avec 40% en poids de bouleau présente des modules de Young (de traction et de flexion) supérieurs à ceux du polyamide (Nylon 6/66 et Nylon 11). De plus, ce composite possède une contrainte de flexion admissible plus élevée que celle du PEHD et du Nylon 11 (Figure 8). Cependant, cette dernière reste inférieure au Nylon 6/66.

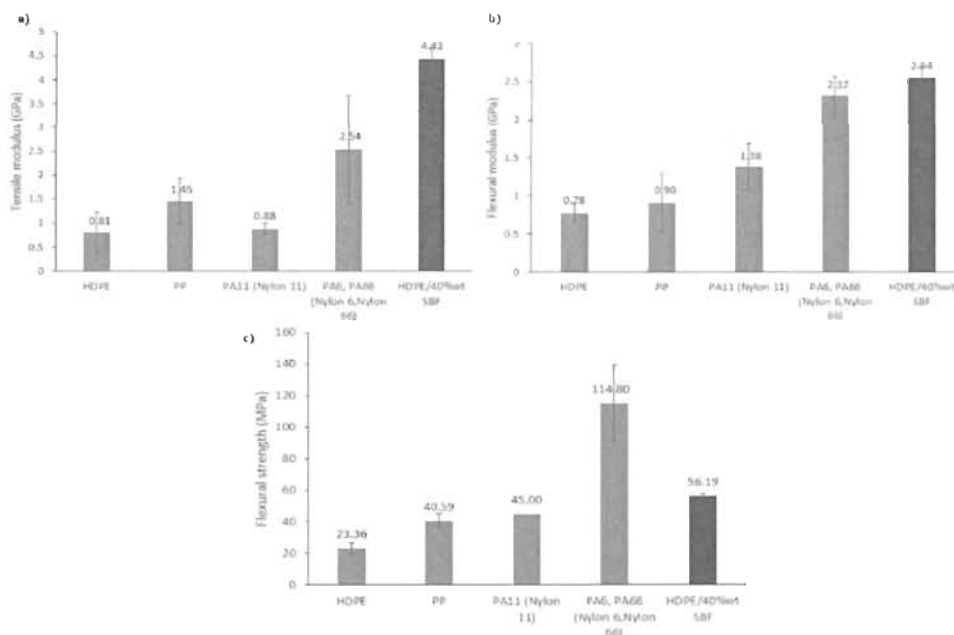


Figure 8: Comparaison des propriétés mécaniques du HDPE avec 40% de fibres et le nylon [ 20 ]

Dans la revue de littérature, plusieurs études se sont intéressées à l'effet du pourcentage de fibres sur les propriétés mécaniques. Raj *et al.* ont fait varier le

pourcentage des fibres de bois assimilées à des fibres courtes avec un rapport de forme équivalent à 6 [21]. Ils ont ainsi remarqué que le module de Young augmente proportionnellement avec le pourcentage de fibres, tandis que la déformation à la rupture diminue (Figure 9).

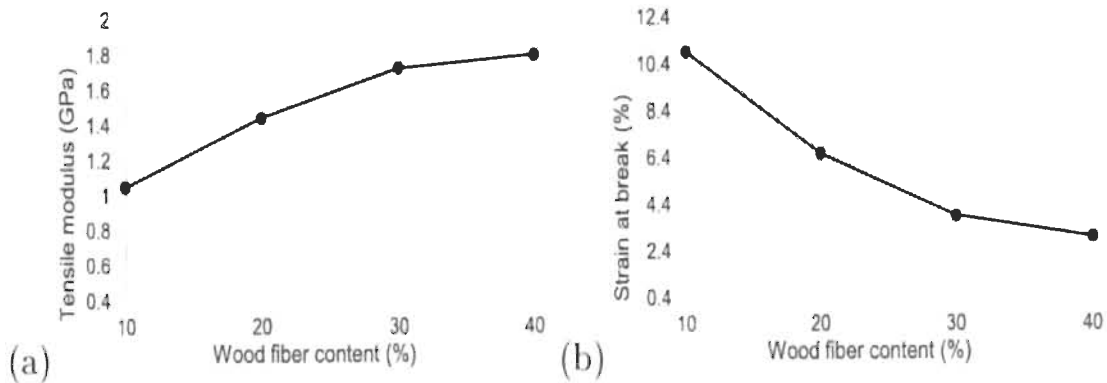


Figure 9: Module de traction et déformation à la rupture pour différents pourcentages de fibres [21]

Dans le même sens, Alancar *et al.* ont étudié l'effet du pourcentage de fibres sur le polyéthylène renforcé de fibres de bouleau [22] avec et sans agent de couplage (Figure 10). Les résultats montrent que la contrainte admissible augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Ils ont aussi étudié l'effet de l'agent de couplage. On voit d'après les résultats que l'agent de couplage améliore la résistance en flexion du matériau.

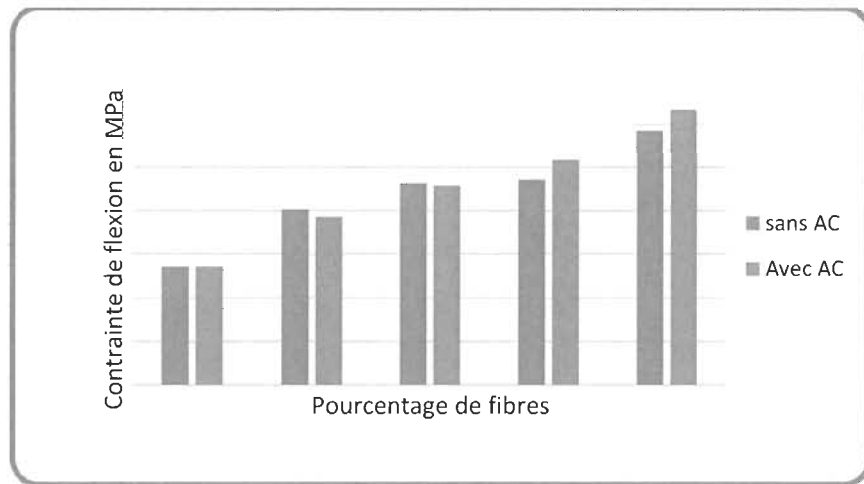


Figure 10: propriétés mécaniques du HDPE et NHDPE pour différents pourcentages de fibres avec et sans agent de couplage tiré de [22]

Plusieurs études se sont intéressées à l'effet des dimensions des fibres sur les propriétés du composite (Figure 11). Miti et Singh ont ainsi constaté que les particules fines procurent plus de rigidité au composite HDPE-bois [23], tandis que Stark et Rowlands ont remarqué que c'est plus le rapport de forme qui est responsable de ce changement des propriétés. Plus il est grand, plus le matériau est rigide [24].

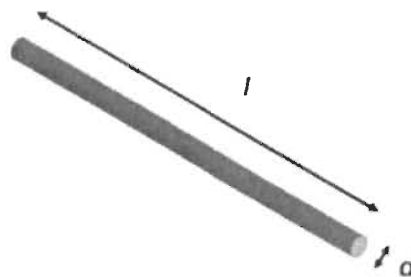


Figure 11: Dimensions d'une fibre

Migneault *et al.* [25], se sont également intéressés à l'effet du rapport de forme (longueur/diamètre) sur les propriétés mécaniques. Le tableau 2 présenté ci-dessous démontre que le module de Young augmente, mais pas d'une façon significative, la variation étant même plus faible que l'erreur, tandis que la variation de la déformation à la rupture ne suit pas une loi précise.

*Tableau 2: Propriétés mécaniques pour différents rapports de forme [25]*

(l/d)	E (Gpa)	$\varepsilon_R(\%)$
21.3	2.99	2.58
13	2.96	2.13
8.3	2.83	2.2

Plusieurs travaux de recherche se sont penchés sur l'étude des propriétés mécaniques des composites thermoplastiques renforcés par des fibres végétales (Tableau 3).

*Tableau 3: Propriétés mécaniques de quelques composites thermoplastiques*

Matériaux	$\sigma_m(Mpa)$	E(GPa)	Références
HDPE/40% bois	17.5	1.49	26
rHDPE/40% chanvre	60.2	2.31	27
PP/30% chanvre	24.46	4.5	28
PP/30 % chènevotte	27.31	3.32	28
PP/40% Bois (pulpe)	50	3	29

On remarque que ces biocomposites ont des propriétés mécaniques intéressantes comparables à celles des matériaux plastiques techniques.

## 2.3. Essais d'impact :

### 2.3.1 La résilience :

Pendant sa durée de vie, une pièce peut subir des chocs mécaniques brutaux dans un environnement où la température peut être très élevée ou au contraire très basse. Dans une telle situation, on doit faire appel à des essais où il faut adapter la vitesse de sollicitation et la température que doit subir réellement le matériau. La résilience est l'aptitude d'un matériau à résister aux chocs. Il y a deux sortes de test pour évaluer le niveau de ténacité d'un matériau : l'essai Charpy et l'essai Izod. Ces tests consistent à calculer l'énergie perdue lors de l'impact, pour en déduire après calcul la résistance au choc.

### 2.3.2 Différence entre essai Charpy et essai Izod :

La différence entre les deux tests réside dans :

- Les dimensions des éprouvettes.
- La disposition de l'éprouvette qui doit être horizontale pour Charpy et verticale pour Izod (Figure 12).
- Le type de défaut.
- Le type de matériau testé.

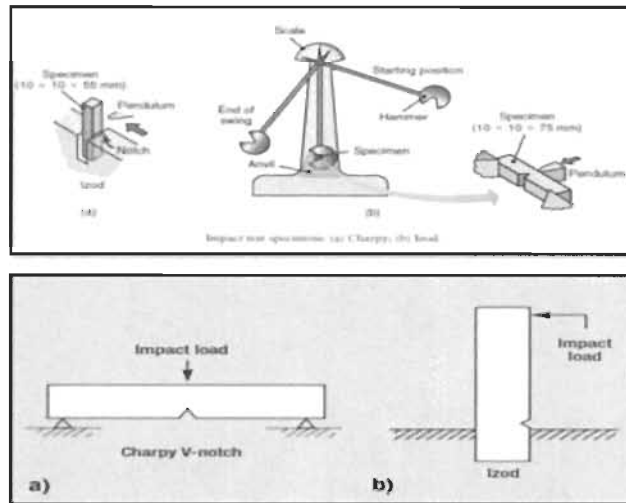


Figure 12: Différence entre essai Izod et Charpy

Dans notre cas, nous allons nous intéresser davantage aux essais Izod pour l'étude de ténacité de notre matériau.

### 2.3.3 Essai Izod

Pour les essais Izod, on doit respecter la norme ASTM D256 [30]. Les dimensions des éprouvettes devront être comme suit : longueur = 64 mm, largeur = 12.7 mm et épaisseur minimale = 3.2mm (Figure 13). Pour valider les résultats, chaque essai doit être répété au moins cinq fois.

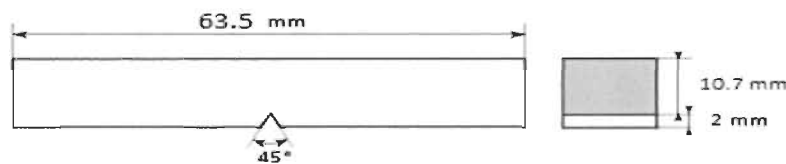


Figure 13 : Dimensions de l'éprouvette selon la norme Izod

### 2.3.4 Calcul de la résistance au choc Izod :

Pour calculer la résistance au choc, on utilise la formule suivante [30] :

$$a_{iN} = \frac{E_c}{h * b} * 10^3 \quad (1)$$

$a_{iN}$  = Résistance au choc d'éprouvettes entaillées en  $\text{KJ/m}^2$

$E_c$  = Énergie absorbée par le choc en joules

$b_N$  = Largeur de l'éprouvette en mm

$h$  = L'épaisseur de l'éprouvette en mm

2.3.5 Effet de la température et la pression de serrage sur les résultats des essais Izod :

Dans l'article [31], les auteurs ont remarqué que la pression de serrage a un effet sur les résultats des tests Izod, même si cela ne suit pas une loi précise, tandis que l'augmentation de la température engendre une amélioration de la résistance au choc du matériau étudié (Figure 14 et 15).

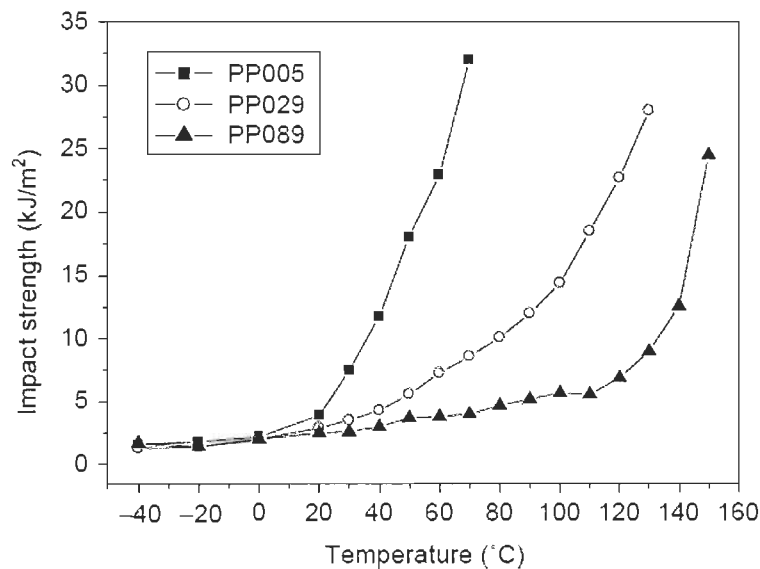


Figure 14 : Effet de la température sur la résistance au choc [31]



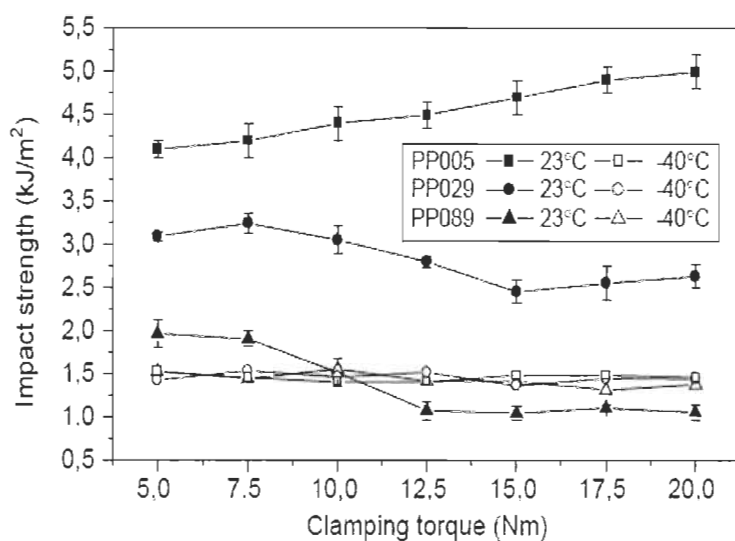


Figure 15: Effet de la pression de serrage sur la résistance au choc pour différentes températures [31]

### 2.3.6 Résistance au choc des composites thermoplastiques/ fibres de bois :

Pour les essais Izod, la littérature comporte beaucoup de travaux qui ont permis d'étudier la ténacité des matériaux biocomposites thermoplastiques (Tableau 4).

Tableau 4: Résistance au choc pour différents composites thermoplastiques renforcés avec des fibres de bois

Matrice	Fibre	Pourcentage (%)	Izod(KJ/m <sup>2</sup> )	Références
PP	Bois (flour)	30	5	32
PP/MAP	Bois (flour)	30	5	32
PP/MAPP coupled IM	Bois(BKP)	40	40	33
PP	Bois(TMP)	40	5.5	34
PP/MAP	Bois(MDF)	30	4	35

On remarque aussi que pour les résistances au choc, les biocomposites présentent des valeurs très intéressantes par rapport aux matériaux plastiques techniques.

## 2.4 Travaux sur les essais de flexion concernant les dents d'engrenages :

### 2.4.1 Différentes méthodes des essais de flexion :

Il y a plusieurs façons d'effectuer des essais de flexion sur les dents d'engrenages. Dans ce travail, nous avons opté pour la méthode porte à faux, puisqu'elle est plus adaptée au banc d'essai que nous avons utilisé pour les essais (Figure 16).

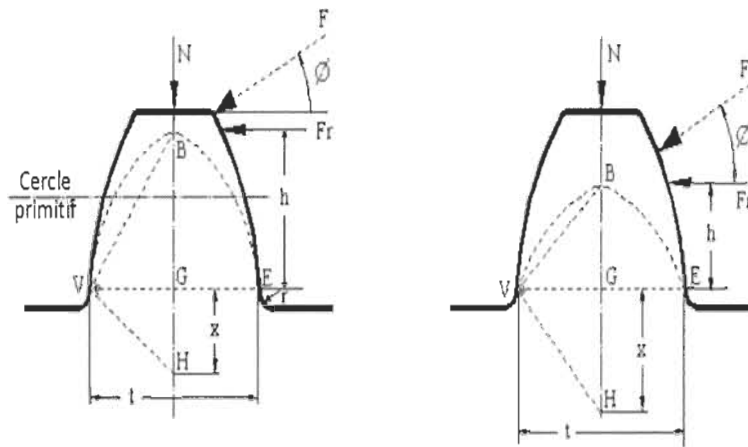


Figure 16: Force sur une dent d'engrenage sollicitée en flexion [36]

Dans le travail d'Akata *et al.*, les auteurs ont utilisé l'essai de flexion à trois points et ont déduit après avoir réalisé une étude par éléments finis et réalisé plusieurs expériences que cette méthode donne de bons résultats[37]. De plus elle est moins coûteuse et se fait en un temps réduit (Figure 17).

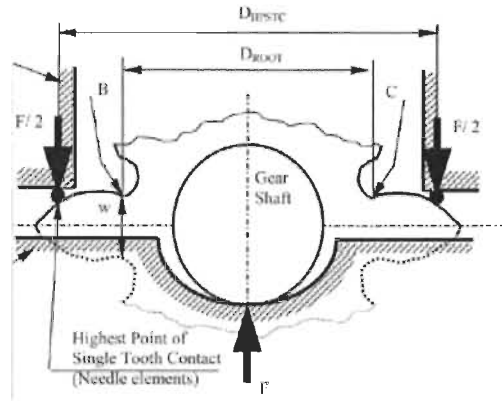


Figure 17: essai de flexion à trois points sur une dent d'engrenage [ 37 ]

Il y a aussi d'autres méthodes pour tester les dents des engrenages comme celle utilisée dans l'article [38], où les auteurs ont utilisé un banc d'essai selon la norme SAE JS1619 (Figure18). Dans ce dispositif, la différence est que la force est divisée sur deux dents déposées sur deux appuis d'une façon symétrique.

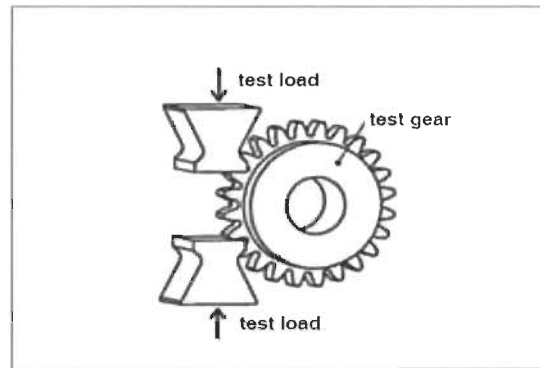


Figure 18 : Test de flexion sur une dent d'engrenage selon la norme SAEJS1619 tiré de [ 38 ]

#### 2.4.2 Calcul de la résistance en flexion

Pour le calcul de la résistance en flexion d'un matériau plastique, on utilise la relation suivante [39] :

$$\sigma_f = \frac{F_t * P_d}{b * Y} \quad (2)$$

Avec :  $F_t$  = charge tangentielle

$P_d$  = pas diamétral, remplacé dans le système par métrique par le module  $m$  ou  $m_n$ , inverse de  $P_d$ , exprimé en mm ;

$b$  = largeur de denture ;

$Y$  = facteur de forme de Lewis.

## 2.5 Méthode de corrélation par images :

La méthode de corrélation par images est une méthode que les chercheurs et industriels adoptent de plus en plus vu les nombreux avantages qu'elle présente, tels que :

- ✓ Un temps réduit.
- ✓ Une facilité d'utilisation.
- ✓ Une absence de contact.
- ✓ Une cartographie complète des champs des déplacements et des déformations.
- ✓ Des résultats plus riches que ceux qui peuvent être obtenus par des jauges de déformations.

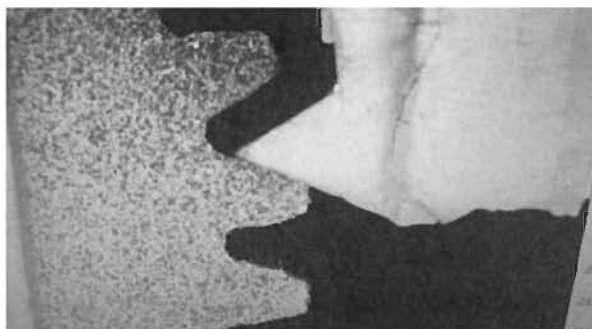
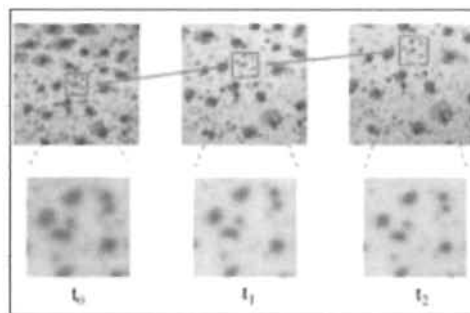


Figure 19: image d'un test flexion prise par la CCD

Le principe de la méthode est de suivre le déplacement des points noirs dans le temps afin de déterminer les valeurs des déplacements par rapport au temps, pour en déduire enfin après calcul la déformation. Les caméras CCD permettent d'acquérir des images numériques avec une définition de 1280 par 1024 pixels. Ces images sont ensuite traitées avec le logiciel DVC (Lavisoft USA). Grâce à ce dispositif, il est possible de mesurer les déplacements et les déformations à la surface d'un objet avec une résolution de quelques centaines de  $\mu\text{m/m}$  en déformations. Le logiciel utilise le principe de corrélation d'images, qui consiste à reconstituer une image en trois dimensions à partir de deux images en deux dimensions. Pour notre étude plane, nous n'avons utilisé qu'une seule caméra CCD pour mesurer les champs des déplacements et des déformations dans le plan de traction (X, Y).



*Figure 20: Principe de la corrélation d'images [40]*

Conclusion :

Après avoir consulté la revue bibliographique, nous constatons que celle-ci comporte encore beaucoup de lacunes en ce qui concerne l'étude de ce matériau. Notamment la ténacité du matériau et l'étude du comportement des

dents des engrenages sollicités en flexion. De plus, l'utilisation de la caméra CCD permettra d'évaluer le comportement en flexion d'une dent d'engrenage, Puisqu'il est difficile d'installer une jauge de déformation pour mesurer les champs de déformations. Tandis qu'à l'aide d'une caméra CCD, on pourra mesurer les champs en utilisant un logiciel adapté, qui permet d'installer une jauge fictive dans la zone souhaitée, mesurer les déplacements et calculer aussi les champs de déformation.

## **Chapitre 3 : Essais Izod**

Introduction :

Dans cette partie, nous étudierons la résistance au choc du biocomposite (polyéthylène renforcé par des fibres de bouleau courtes). Cette résistance (ténacité) une fois mesurée peut être comparée à la résistance au choc des éprouvettes de matériaux plastiques techniques équivalentes.

Pour ce faire, nous examinerons en premier lieu l'effet de l'agent de couplage sur l'énergie de rupture du matériau, puis nous nous pencherons sur l'effet du pourcentage de fibres et enfin nous étudierons l'effet des basses températures sur la résilience du matériau.

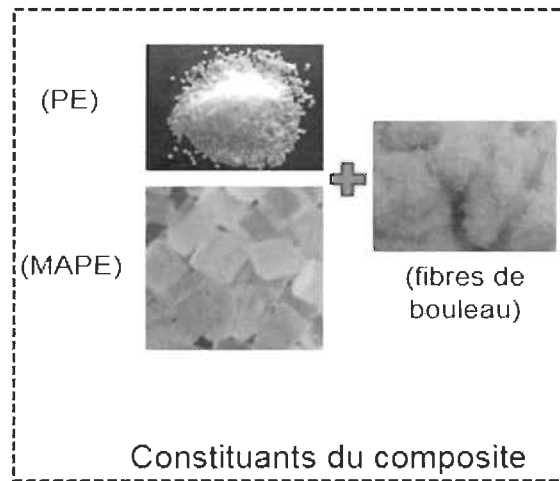
### 3.1. Fabrication :

#### 3.1.1 Matériau :

La fabrication des éprouvettes se fait en deux étapes : la préparation de la pâte et le moulage. La fabrication de la pâte est assurée par un mélangeur à deux rouleaux et une presse disponible au niveau du centre intégré de pâtes et papiers (CIPP). La technique de moulage par compression est utilisée pour la fabrication des éprouvettes. Tous les échantillons ont donc été préparés dans le mélangeur de marque (Thermon CW Brabender, modèle T-303). Les grains de la matrice (figure 21) ont été fondus sur des rouleaux à 175 °C, et les fibres ont ensuite été ajoutées au rapport pondéral désiré (de 0 à 40 % en poids) (Figure 22). Les échantillons ont été produits au moyen du procédé de moulage à une température de 205 °C en utilisant une presse hydraulique, à une pression de 10



MPa, maintenue pendant 20 minutes (Figure 23). Enfin, le moule a été refroidi à 60 °C et les échantillons ont été extraits avec soin.



*Figure 21: Constituants du composite*



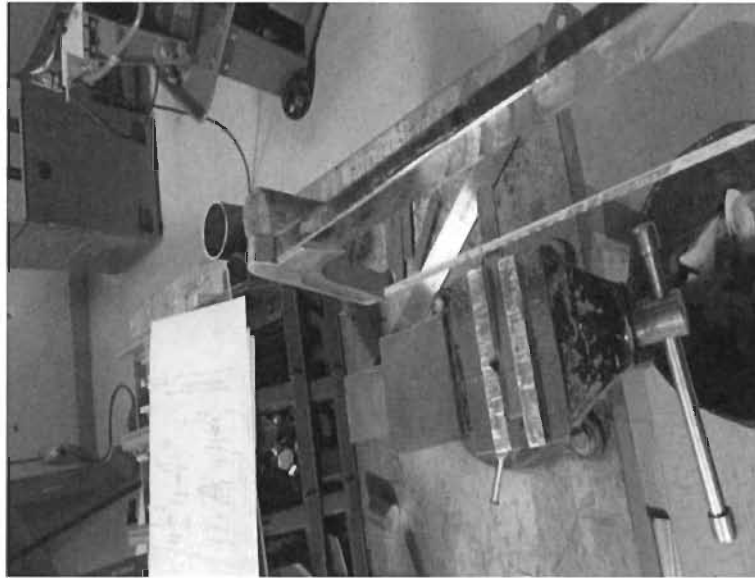
*Figure 22: mélangeur de marque brebender*



*Figure 23: Presse hydraulique à plateaux chauffants.*

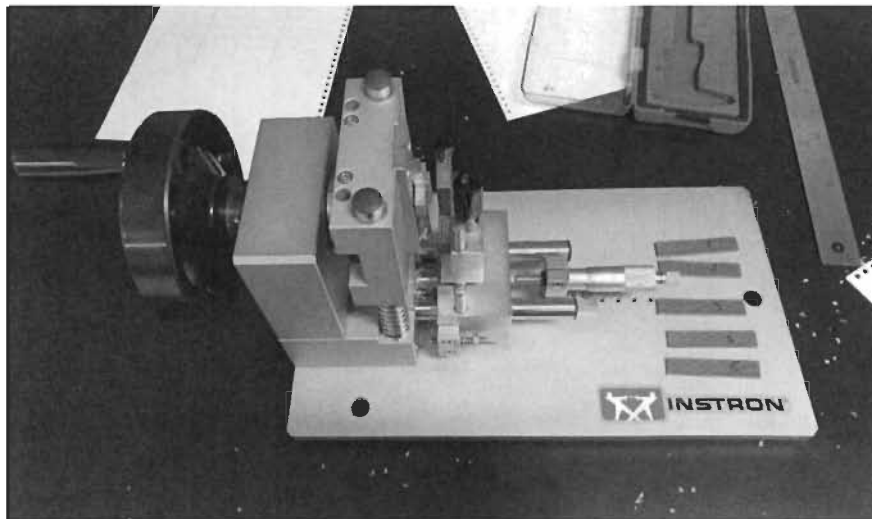
### 3.1.3 Usinage des éprouvettes Izod :

Selon la norme Izod, les dimensions doivent être comme suit :  $12.7 \times 3.2 \times 64$  mm<sup>3</sup>. Nous avons utilisé un moule pour des éprouvettes en flexion. Les dimensions de ces dernières présentent donc une longueur plus importante que celle imposée par la norme Izod. Par conséquent, nous avons découpé les éprouvettes pour respecter les dimensions préconisées par la norme Izod (Figure 24).



*Figure 24: L'opération d'usinage à l'aide d'une scie*

Selon la norme, il faut aussi usiner une entaille en v au milieu des éprouvettes d'une profondeur de 2 mm avant de passer aux essais. Un dispositif de chez Instron (figure 25) a été utilisé pour créer cette entaille. Il est très important d'avoir une forme d'entaille respectant la norme vu la sensibilité des résultats au défaut introduit.



*Figure 25: Dispositif pour créer une entaille en v:*

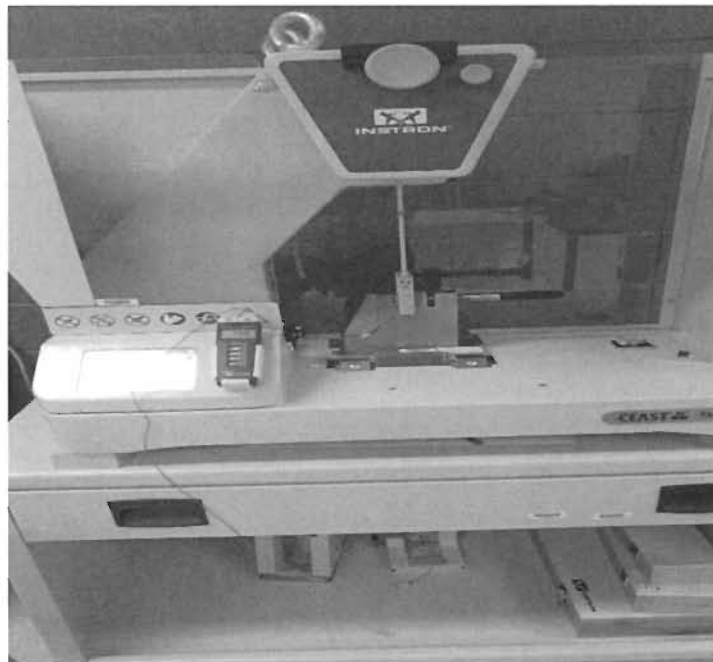
### 3.2 Essai Izod :

Les essais Izod sont réalisés sur la machine à mouton pendule CEAST 9050 de la compagnie INSTRON. La figure 26 illustre cet appareil. Le mouton pendule est conçu pour déterminer la ductilité et la fragilité des matériaux pour des énergies de rupture équivalant au moins à 20 % de la capacité du marteau utilisé.

On a testé des éprouvettes en variant le pourcentage des fibres de bouleau (0%,10%,20%,30%,40%) avec et sans agent de couplage.

Pour l'essai Izod, il faut bien placer l'éprouvette sur le mandrin à la verticale, puis entrer les dimensions (largeur et d'épaisseur) de chaque éprouvette avant de relâcher le marteau afin de réaliser l'essai.

Il faut réaliser au moins cinq essais pour enfin prendre une moyenne des énergies dissipées mesurées pour chaque pourcentage d'éprouvette.



*Figure 26: Machine d'essais pour Izod et Charpy*

### 3.3. Résultats et interprétation :

Dans cette partie, nous présenterons les résultats concernant l'effet du pourcentage de fibre, l'agent de couplage et la température.

#### 3.3.1 Pourcentage de fibres et agent de couplage :

Les résultats seront présentés sous forme d'histogramme décrivant ainsi les valeurs des moyennes des énergies dissipées pour chaque pourcentage de fibres avec et sans agent de couplage (Figure 27).

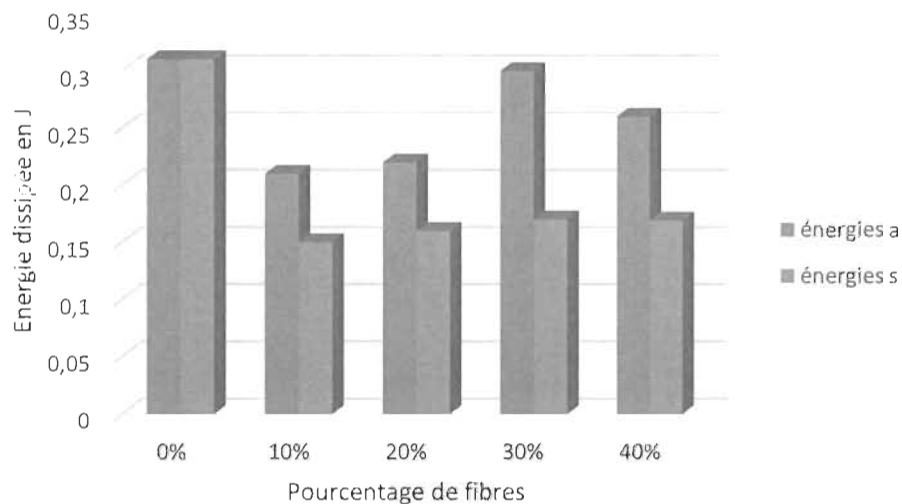


Figure 27 : Énergie moyenne dissipée pour chaque pourcentage de fibres

Tableau 5: Moyennes et écarts types des tests Izod pour les différents pourcentages de fibres

	0	10 s	10 a	20 s	20 a	30 s	30a	40 s	40 a
Énergie(J)	0.31	0.15	0.21	0.16	0.22	0.175	0.3	0.17	0.269

KJ/m <sup>2</sup>	9.25	4.49	6.23	4.69	6.35	5.13	8.8	4.96	7.76
Écart type (KJ/ m <sup>2</sup> )	0.71	0.28	0.66	0.23	0.83	0.73	1.44	1.11	0.51
Ratio	0.08	0.06	0.11	0.05	0.13	0.14	0.16	0.14	0.10

On remarque d'après les résultats présentés dans le tableau 5 que l'énergie dissipée augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Cependant, à partir de 40 % de fibres, la résistance au choc tend à diminuer.

On remarque aussi que l'ajout d'un ajout de couplage augmente la résistance au choc.

### 3.3.2. Température :

Pour étudier l'effet de la température sur la résistance au choc Izod, on a effectué des tests Izod sur des éprouvettes comportant 40 % de fibres avec agent de couplage pour trois différentes températures, soit -10,0 et 20 degrés.

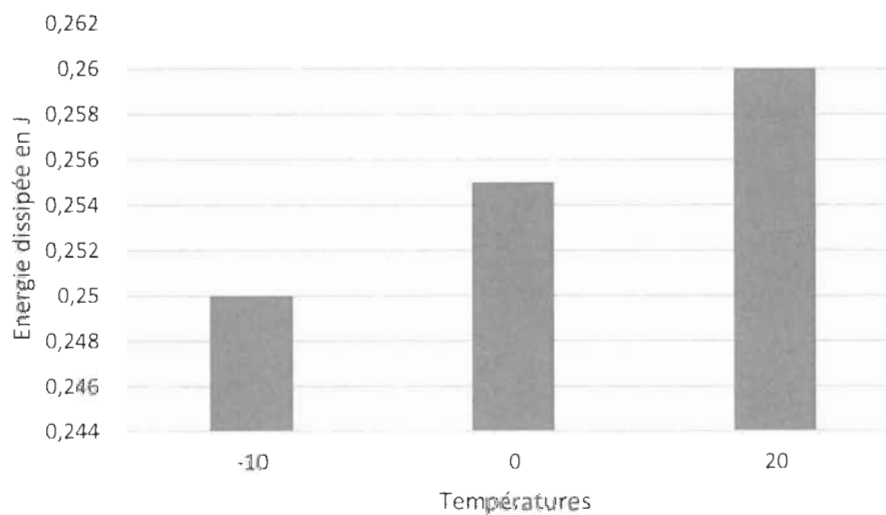


Figure 26: Résistance au choc pour différentes températures

Tableau 6: résistance au choc pour différentes températures à 40 % de fibres avec agent de couplage

Températures	0 degré	-10 degrés	20 degrés
Énergie en J	0.254	0.250	0.265
KJ/m <sup>2</sup>	7.44	7.31	7.76
Écart type (KJ/ m <sup>2</sup> )	0.49	0.36	1.11
Ratio	0.07	0.05	0.14

On remarque d'après le tableau 6 et la figure 28 que la diminution de la température jusqu'à moins dix degrés n'a aucun effet sur la résistance au choc, étant donné que l'erreur est supérieure à la variation des valeurs.

Conclusion :

Les résultats des tests Izod ont montré que :

- 1) La résistance au choc augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres, sauf pour 40 % où la résistance tend à diminuer.
- 2) L'ajout d'un agent de couplage améliore la résistance au choc du matériau.
- 3) La diminution de la température jusqu'à moins de dix degrés n'a aucun effet sur la résistance au choc du matériau étudié.

## **Chapitre 4 : Essais de flexion sur les dents des engrenages**



Introduction :

Dans ce quatrième chapitre, nous sommes passés de l'éprouvette à une application de ce matériau (les engrenages). Ce que nous souhaitons déterminer est la résistance en flexion à la racine de la dent. De plus nous avons étudié l'effet du pourcentage de fibres sur la résistance en flexion d'une dent d'engrenage. Étant donné que l'utilisation d'une jauge de déformation s'avère très compliquée, puisqu'il y a contact entre le poinçon et la dent, nous avons opté pour la méthode non destructive basée sur la corrélation d'images.

Nous avons tracé en premier lieu les courbes contrainte déformation pour avoir une idée claire sur le comportement des dents des engrenages face à la sollicitation en flexion du début du test jusqu'à la rupture, puis nous nous sommes intéressés aux propriétés mécaniques du matériau, à savoir le module de flexion et la résistance en flexion à la racine de la dent et finalement nous avons examiné les modes d'endommagement à la rupture.

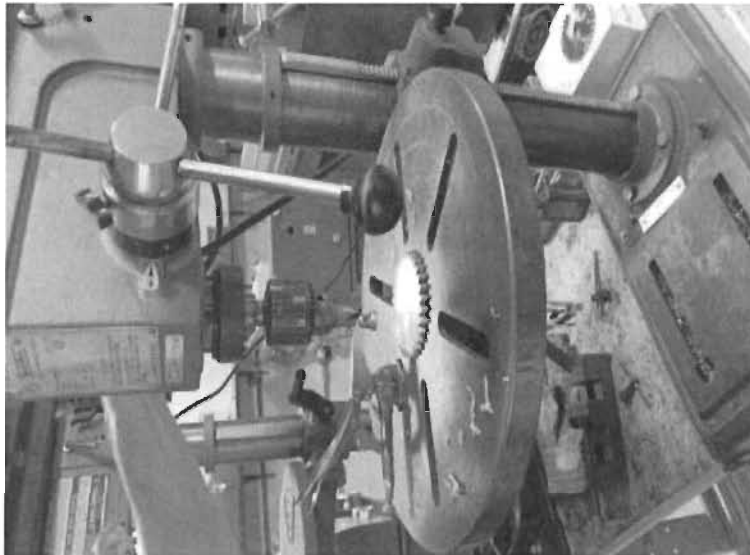
#### 4.1. Fabrication :

##### 4.1.1 Fabrication de la pâte et moulage des engrenages :

Pour la fabrication des engrenages, il s'agit du même protocole de fabrication que celui présenté au chapitre 3. Toutefois, pour les engrenages, il faut utiliser un moule différent de celui des éprouvettes.

#### 4.1.2 Usinage des engrenages :

Pour pouvoir monter les engrenages sur le banc d'essai, il faut usiner un trou au milieu de l'engrenage d'un diamètre de 0.501 pouces. Pour ce faire, il faut commencer par utiliser un foret à centrer, puis un foret de 0.480 pouces et finalement un alésoir de 0.501 pouces (Figure 28).



*Figure 29: Usinage d'un trou au milieu de l'engrenage*

#### 4.2. Matériel :

##### 4.2.1. Banc d'essai de flexion :

Le banc d'essai de flexion utilisé (Figures 29 et 30) présente beaucoup d'avantages, tels que les suivants :

- ✓ Permet de tester des engrenages de différentes tailles.
- ✓ Permet de filmer la zone testée par la caméra CCD.
- ✓ Permet de tester plusieurs dents sans enlever l'engrenage.
- ✓ Permet de passer d'un engrenage à un autre en un temps trop court.

✓ Permet de régler l'angle de pression.

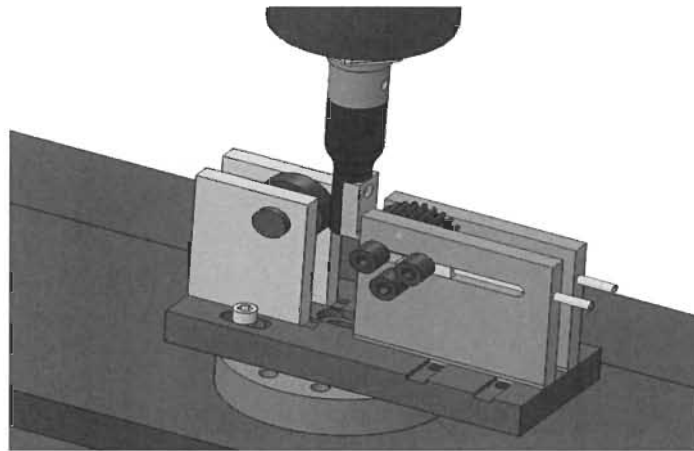


Figure 30: Banc d'essai

Les roulements à rouleaux cylindrique permettent d'éviter la composante horizontale qui pourrait nuire au bon fonctionnement de la machine instron.

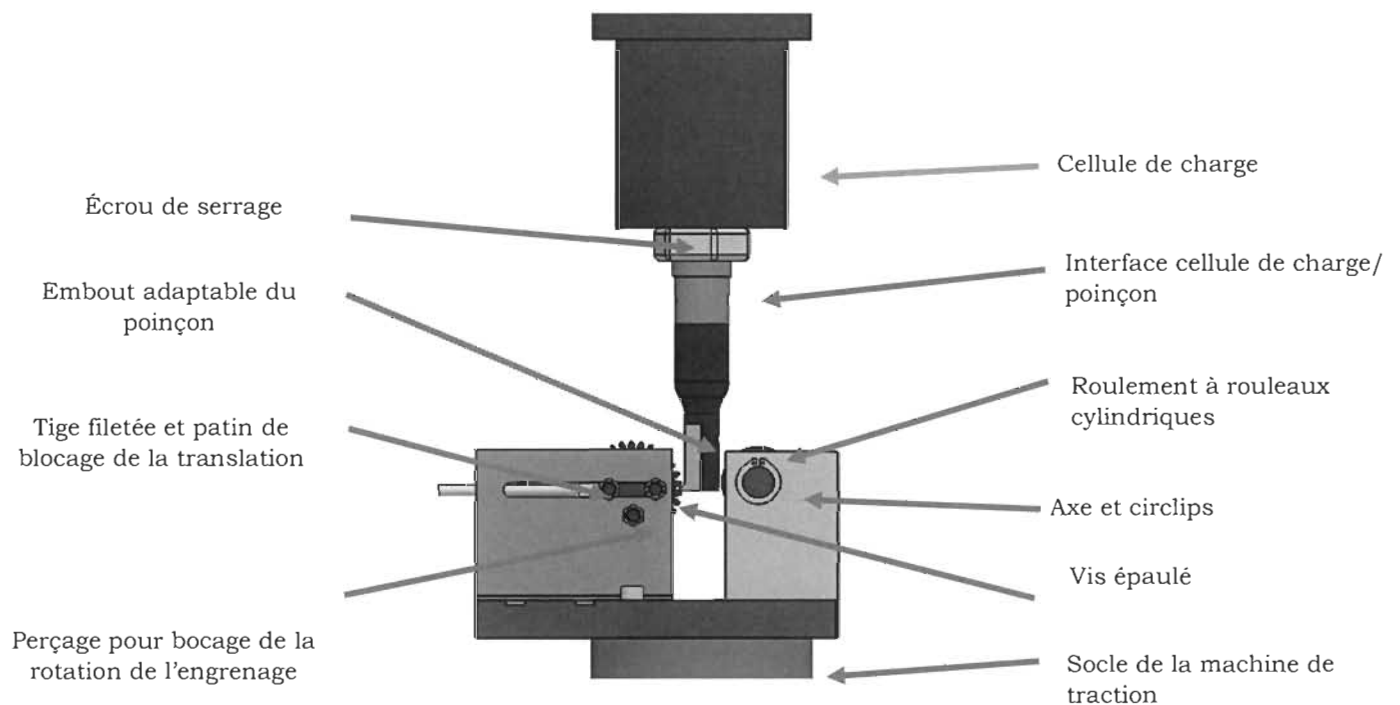
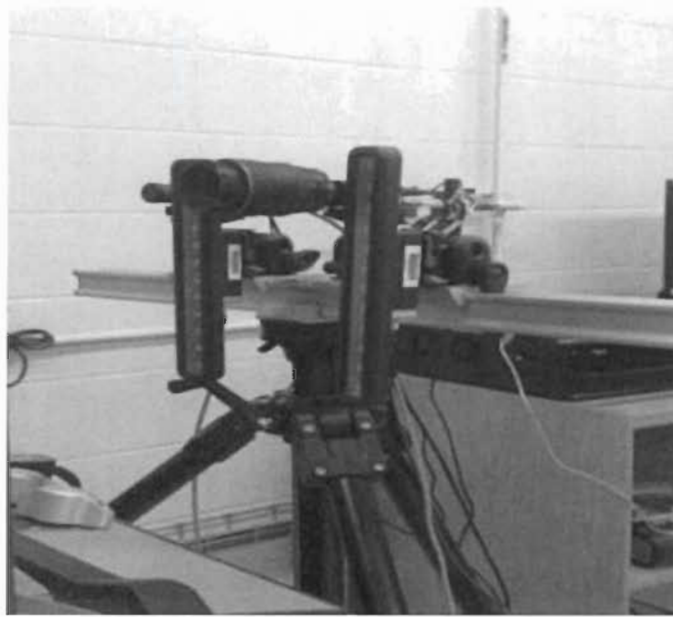


Figure 31: Composantes du banc d'essai

#### 4.2.2 Caméra CCD :

On a utilisé les caméras ccd pour calculer la déformation en utilisant la méthode de corrélation d'images (Figure 32).

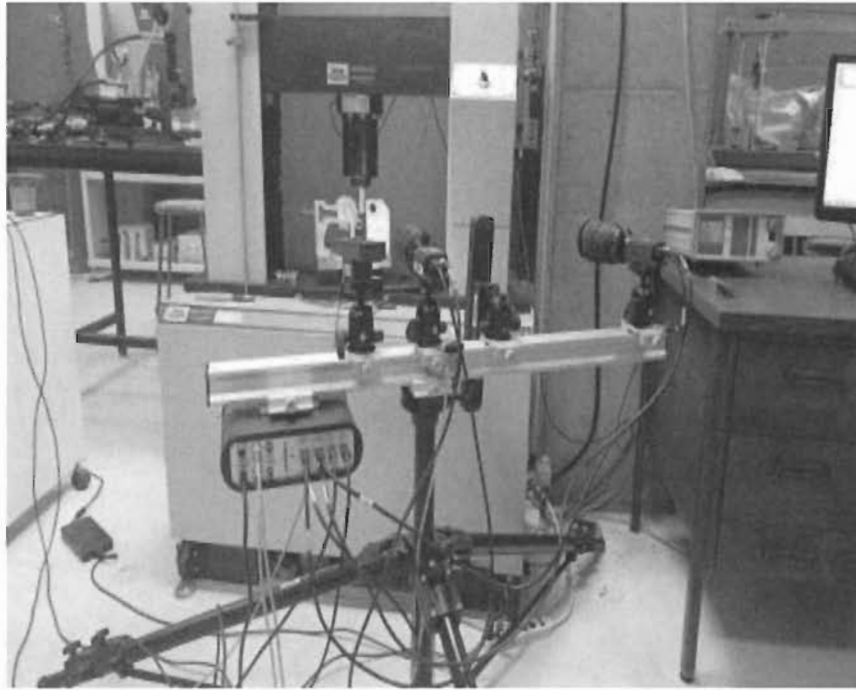


*Figure 32: Caméras CCD*

Pour avoir des résultats précis il faut que la surface des engrenages soit bien droite par rapport aux caméras CCD et que la peinture soit bien faite.

#### 4.2.3 Machine de traction :

Les essais de flexion ont été réalisés sur une machine de marque Instron qu'on voit sur la figure 33. Elle est dotée d'une cellule de charge de 150 kN. On a installé dessus le banc d'essai présenté précédemment pour qu'elle soit adaptée aux tests de flexion des dents des engrenages (Figure 33).



*Figure 33: Banc d'essai installé sur la machine de traction*

#### 4.3. Design expérimental :

Les tests consisteront à réaliser des tests de flexion en statique sur les dents des engrenages en variant le pourcentage des fibres de bouleau (0%,20%,40%).

Les tests nécessitent la présence de deux opérateurs, l'un sur l'ordinateur lié à la machine de traction pour lancer la cellule de charge et l'autre sur l'ordinateur lié à la caméra CCD pour lancer la caméra en même temps et obtenir des résultats plus fiables. Le logiciel Davis qui traite les images obtenues par la CCD nous a permis d'obtenir les champs de déplacements en fonction du temps (Figure 34) tandis que l'ordinateur lié à la machine de traction nous a permis d'obtenir la force en fonction du temps (voir annexes).

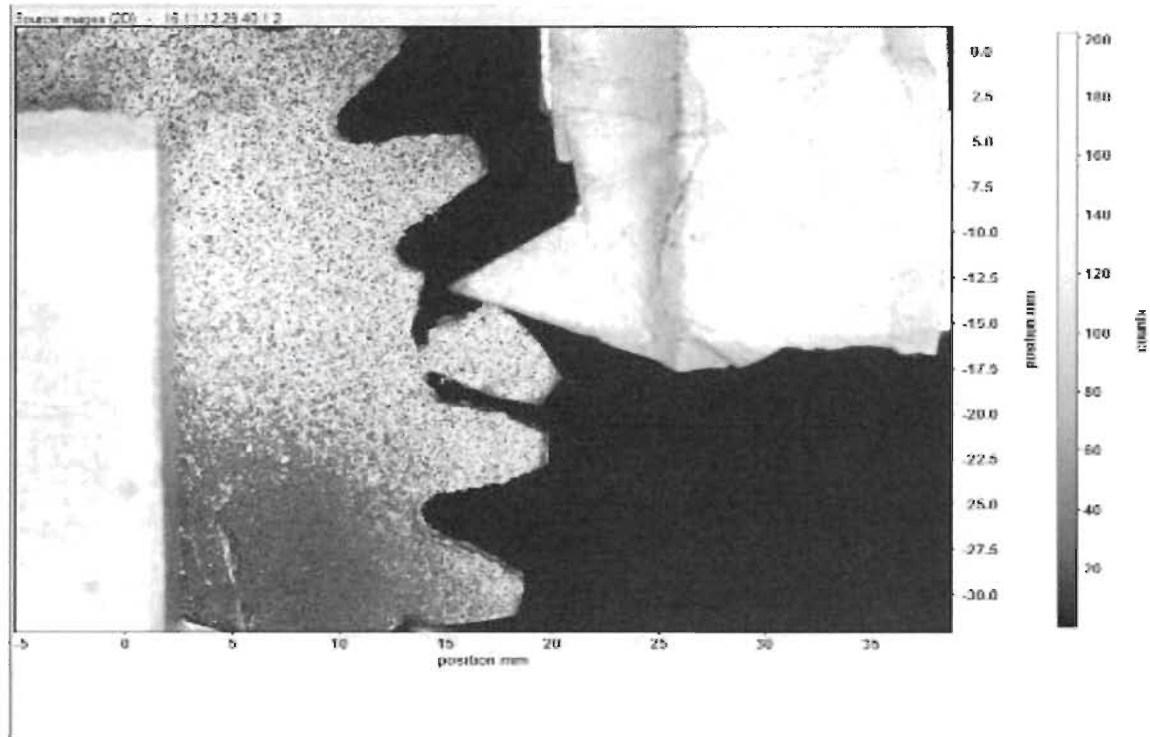


Figure 34: Image CCD de la rupture d'une dent lors d'un test en flexion

Étant donné que notre objectif est de tracer la courbe contrainte-déformation, il fallait aussi avoir la valeur des contraintes par rapport au temps afin que, d'un côté, pour une valeur  $t$ , on ait la déformation fournie par le traitement des images de la caméra CCD et de l'autre côté, les valeurs des contraintes.

Pour calculer la résistance de flexion à la racine de dent, on a utilisé la relation suivante [39] :

$$\sigma_f = \frac{F_t * P_d}{b * Y} \quad (2)$$

Avec :  $F_t$  = charge tangentielle

$P_d$  = pas diamétral, remplacé dans le système par métrique par le module  $m$  ou  $m_n$ , inverse de  $P_d$ , exprimé en mm;

$b$  = largeur de denture ;

$Y$  = facteur de forme de Lewis.

#### 4.4. Résultats et interprétation :

##### 4.4.1. Courbes contraintes déformation :

Cas du polyéthylène pur :

Les essais ont été réalisés sur six dents d'engrenages. La vitesse de sollicitation est de 3mm/min.

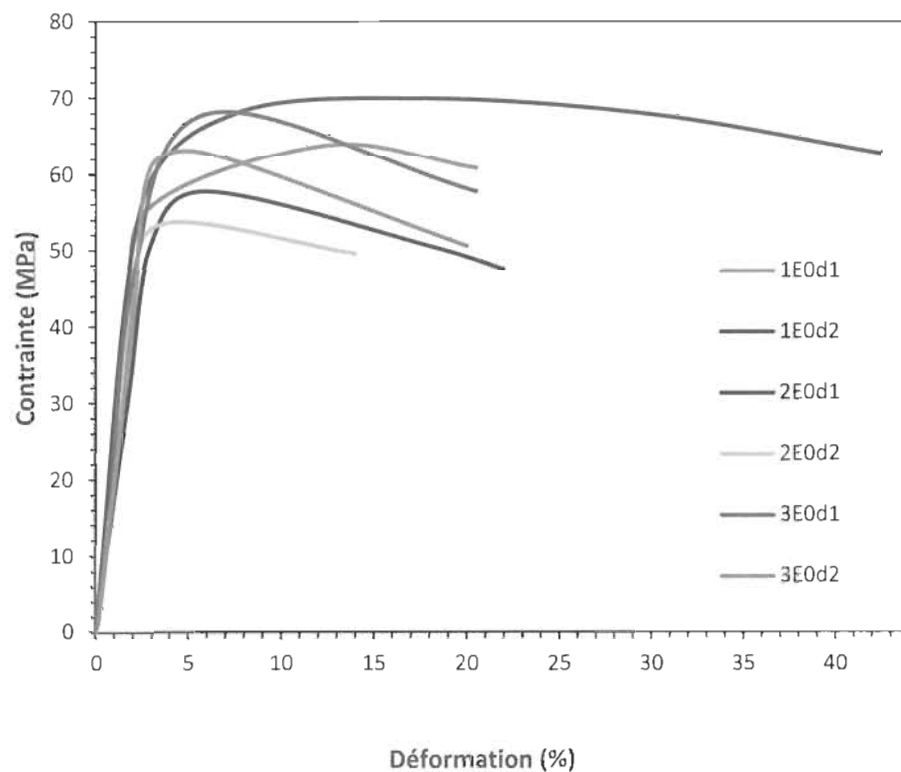


Figure 35: Courbes contrainte-déformation pour le cas de 0% de fibres

Les résultats des tests sont présentés ci-dessous : (Figure 34)

Tableau 7: Résultats des essais de flexion pour le cas de 0% de fibres

Engrenages	Dents	$F_{max}$	$\sigma_{max}$	Module de flexion
E0.1	d1	630	63,945	1,69
E0.1	d2	670	70,035	2,23
E0.1	d3	500	50,75	1,74
E0.2	d1	530	53,795	2,03
E0.3	d1	670	68,005	2,54
E0.3	d2	620	62,93	2,03
	moyenne	603,33	61,58	2,04
	écart type	72,02	7,72	0,32
	ratio	0,12	0,13	0,15

L'analyse des résultats est effectuée en se basant sur l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation. Celle-ci s'effectue en suivant les phases suivantes (figure 35) :

1. La première phase élastique linéaire se caractérise par un module élastique E;
2. Dans la deuxième phase, la courbe perd sa linéarité initiale traduisant le début de la plasticité et de l'endommagement du composite jusqu'à une contrainte maximale;
3. Lors de la dernière phase, la contrainte diminue jusqu'à la rupture finale de la dent.



Ces trois phases peuvent être observées sur les figures 35. Lors des tests, la dent ne se casse pas tout à fait. Le test est arrêté lorsque la dent sollicitée entre en contact avec la dent voisine. Les valeurs du module de flexion varient entre 1.74 et 2.54 avec une moyenne de 2.04 GPa.

Cas d'un composite à 20 % de fibres :

Les essais ont été réalisés sur six dents d'engrenages. La vitesse de sollicitation est de 3mm/min

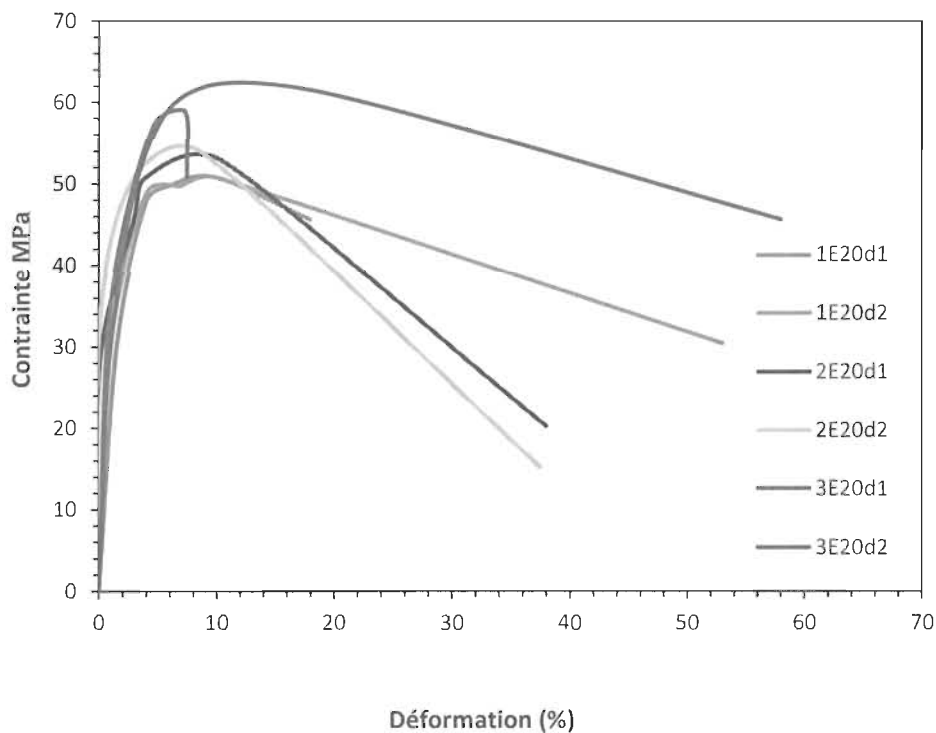


Figure 36: Courbes contrainte-déformation pour le cas de 20% de fibres

On présente ci-dessous les résultats des trois engrenages testés : (Tableau 8)

Tableau 8: Résultats des essais de flexion pour le cas de 40% de fibres

Engrenages	Dents	$F_{\max}$	$\sigma_{\max}$	Module de flexion
E20.1	d1	500	50,75	2,03
E20.1	d2	500	50,75	3,05
E20.2	d1	520	52,78	2,53
E20.2	d2	530	53,795	2,98
E20.3	d1	600	60,9	3,05
E20.3	d2	530	58,87	1,82
	moyenne	530	54,64	2,57
	écart type	36,88	4,28	0,54
	ratio	0,07	0,08	0,02

On remarque aussi que pour le cas de 20%, on a aussi trois phases :

1. Une première phase élastique linéaire caractérisée par un module élastique E;
2. Une deuxième phase où la courbe perd sa linéarité initiale traduisant le début de la plasticité et l'endommagement du composite jusqu'à une contrainte maximale;
3. Une dernière phase dans laquelle la contrainte diminue jusqu'à la rupture finale de la dent.

Ces trois phases peuvent être observées sur les figures 36. Lors des tests, il y a des dents qui cassent, tandis que pour d'autres, les dents ne se cassent pas vraiment. Le test est arrêté lorsque la dent sollicitée entre en contact avec la dent

voisine. Les valeurs du module de flexion varient entre 1.82 et 3.05 avec une moyenne de 2.57 Gpa.

Cas d'un composite à 40 % de fibres :

Pour le cas de 40 % de fibres les essais ont été réalisés sur six dents d'engrenages. La vitesse de sollicitation est de 1mm/min.

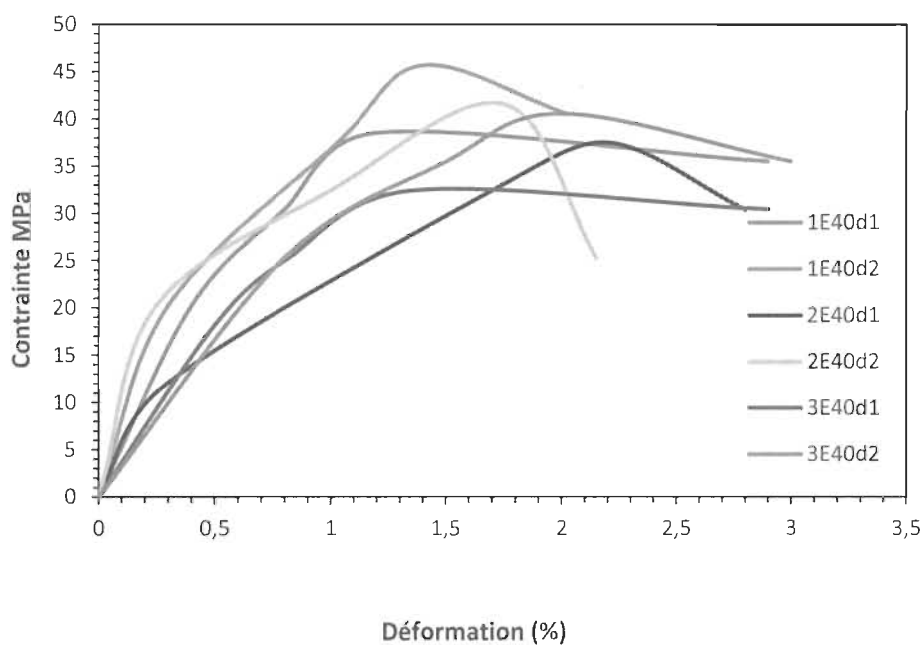


Figure 37: Courbes contrainte-déformation pour le cas de 40% de fibres

Les résultats des tests sont présentés ci-dessous : (Tableau 9)

Tableau 9: Résultats des essais de flexion pour le cas de 40% de fibres

Engrenages	Dents	$F_{\max}$	$\sigma_{\max}$	Module de flexion
E40.1	d1	380	38,57	5,08
E40.1	d2	450	45,675	6,77

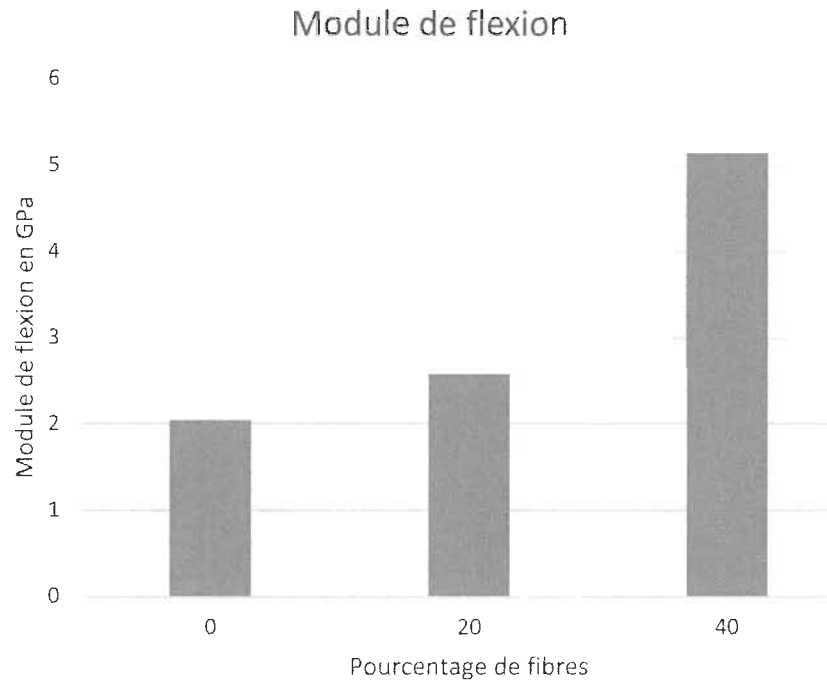
E40.2	d1	370	37,555	4,06
E40.2	d2	410	41,615	8,12
E40.3	d1	320	32,48	3,65
E40.3	d2	400	40,6	3,17
	moyenne	388,33	39,42	5,14
	écart type	43,55	4,42	1,94
	ratio	0,11	0,11	0,04

De même pour le cas de 40% de fibres, on a trois phases :

1. Une première phase élastique linéaire caractérisée par un module élastique E;
2. Une deuxième phase où la courbe perd sa linéarité initiale traduisant le début de la plasticité et l'endommagement du composite jusqu'à une contrainte maximale;
3. Une dernière phase où la contrainte diminue jusqu'à la rupture finale de la dent.

Ces trois phases peuvent être observées sur la figure 37. Lors des tests, toutes les dents cassent et les valeurs du module de flexion varient entre 3.17 et 8.12 avec une moyenne de 5.14 Gpa.

On remarque aussi, comme présenté sur la figure 41, que le module de flexion augmente en accroissant le pourcentage de fibres.



*Figure 38: Histogramme des modules de flexion par rapport aux pourcentages de fibres*

#### 4.4.2 Cartographies de déformation :

Dans cette partie, nous présenterons des cartographies des champs de déformation pour le cas de 40 % de fibres.

Pour ce faire, nous commencerons par exposer la cartographie des champs de déformation pour la partie élastique (Figure 39).

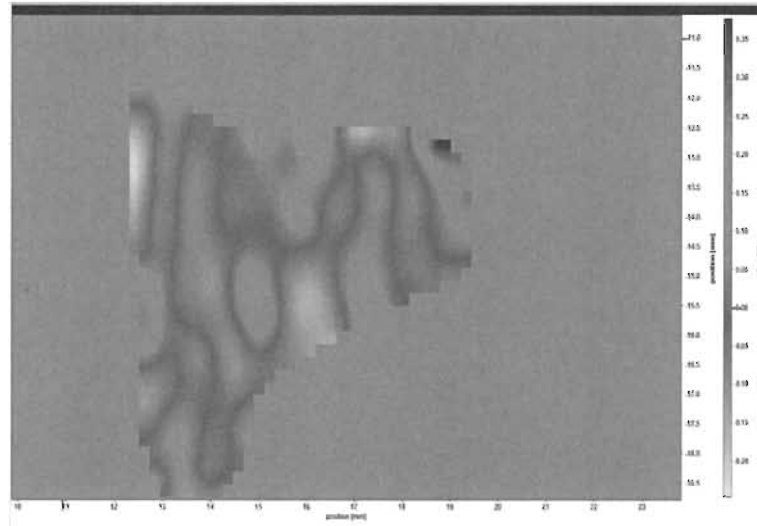


Figure 39: Cartographie des champs de déformation de la partie élastique pour le cas de 40 %

On remarque que dès le début du test, la racine de la dent est la zone la plus sollicitée.

En ce qui concerne la partie plastique, on peut observer que la racine de la dent est encore la zone la plus sollicitée avec des pourcentages de déformation plus élevés (Figure 40) :

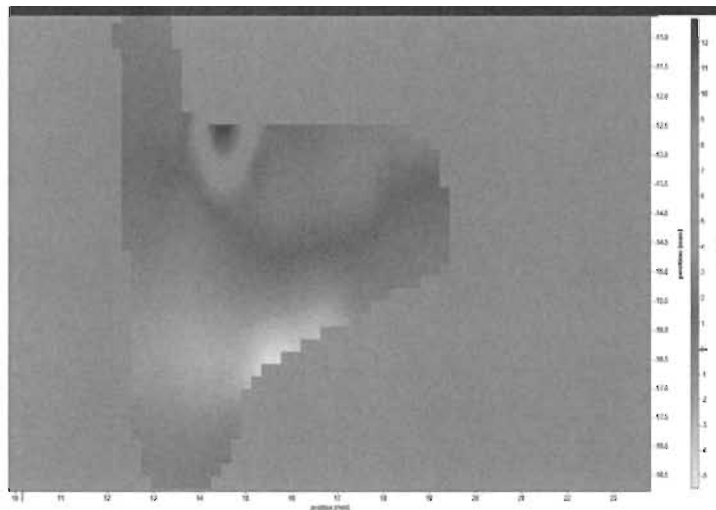
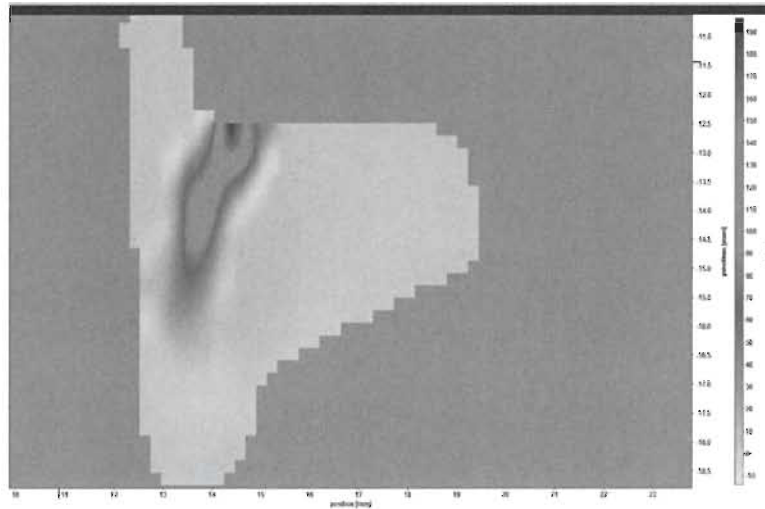


Figure 40: Cartographie des champs de déformation de la partie plastique pour le cas de 40 %

Puis, on remarque qu'avant la rupture, les pourcentages de déformation ont augmenté d'une façon significative, surtout à la racine de la dent où la fissure va s'enclencher, causant alors la rupture de la dent (Figure 41).



*Figure 41: Cartographie des champs de déformation juste avant la rupture de la dent pour le cas de 40 %*

## Conclusion :

Les résultats des essais de flexion sur les dents des engrenages en utilisant la méthode de corrélation d'images ont montré que l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation s'effectue selon les phases suivantes (figure 35) :

1. Une première phase élastique linéaire caractérisée par un module élastique  $E$ ;
2. Une deuxième phase où la courbe perd sa linéarité initiale traduisant le début de la plasticité et l'endommagement du composite jusqu'à une contrainte maximale;

3. Une dernière phase où la contrainte diminue jusqu'à la rupture finale de la dent.

Pour les engrenages à 0 %, on dispose d'un module de flexion faible d'une valeur de 2.04. En ajoutant les fibres de bouleau, on remarque que le module de flexion augmente pour atteindre 2.57 Gpa. Les engrenages à 40 % de fibres, quant à eux, présentent un module de flexion élevé de 5.14 Gpa. En comparant les résultats des trois différents pourcentages de fibres, on peut observer que plus on augmente le pourcentage de fibres, le module de flexion augmente.



## **Chapitre 5 : Conclusion générale**

## Conclusion générale :

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au matériau composite polyéthylène avec fibres de bouleau courtes, et plus précisément à la résistance au choc en utilisant l'essai Izod et à la résistance à la flexion d'une dent d'engrenage.

Pour la résistance au choc, des tests ont été effectués sur des éprouvettes selon la norme ASTM D256 pour différents pourcentages et ce, avec et sans agent de couplage. Les résultats de ces tests sont les suivants :

- 1) En augmentant le pourcentage de fibres, la résistance au choc augmente, sauf pour le cas de 40 % où la résistance tend à diminuer.
- 2) L'ajout d'un agent de couplage augmente aussi la résistance au choc.
- 3) La température n'a aucun effet sur la résistance au choc en diminuant la température jusqu'à moins dix degrés.

En ce qui concerne les essais de flexion sur une dent d'engrenage, on a utilisé un banc d'essai fabriqué à l'université, qu'on a installé sur la machine Instron. On a effectué les tests sur six dents pour chaque pourcentage (0%, 20% et 40 %), afin d'étudier l'effet de cette variable sur la résistance en flexion. On a alors remarqué qu'en ajoutant les fibres de bois, le module de flexion a amplement augmenté en passant de 2.04 pour le cas de 0% de fibres à 2.57 pour 20 % de fibres pour atteindre 5.14 pour le cas du 40 % de fibres.

Le matériau présente de très bons résultats face à la résistance au choc, même pour de basses températures, et il est doté d'un module de flexion intéressant. Tous ces résultats sont encourageants et incitent à étudier encore davantage ce matériau, afin que les industriels puissent l'utiliser à l'avenir pour des engrenages ou même pour d'autres applications. La résistance en fatigue pourrait s'avérer une recherche nécessaire pour compléter l'étude qui constitue le sujet de ce mémoire, étant donné que les engrenages sont sollicités d'une façon cyclique dans les machines où ils sont utilisés.

## Liste des références :

- [1] *Adaptation de chez plast-fb: nos matières plastiques usinées: <http://www.plast-fb.com/matieres-plastiques-usinees.html> pfb & plastiques façonnés du béthunois 2011.*
- [2] Wang K., al. (2014). Dynamic behavior and flame retardancy of HDPE/hemp short fiber composites: Effect of coupling agent and fiber loading. *Composite Structures*, 113 (1),74-82.
- [3] Kaouache, B., Addiego, F., Hiver, J. M., Ferry, O., Toniazzo, V. et Ruch,D. (2013). In situ mechanical characterization of short vegetal fibre-reinforced highdensity polyethylene using X-ray tomography. *Macromolecular Materials and Engineering*, 298 (12).
- [4] Mijiyawa, F. (2018). Formulation, caractérisation, modélisation et prévision du comportement thermomécanique des pièces plastiques et composites de fibres de bois : application aux engrenages. These. Trois rivières, *Université du Québec à Trois Rivières*, 256 p.
- [5] Korjenitc, A., Petranek, V., Zach, J., Hroudova, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and buildings*, 43(9), 2518-2523.
- [6] Placet, V., Cisse, O., Boubakar, M.L. (2012a). Influence of environmental relative humidity on the tensile and rotational behaviour of hemp fibres. *J.Mater. Sci*, 47(7), 3435-3446.
- [7] Baley, C., Morvan, C., Grohens, Y. (2005). Influence of the absorbed water on the Tensile Strenght of Flax Fibers. *Macromol. Symp*, 222(1).
- [8] Duval, A., Bourmaud, A., Augier, L., Baley, C. (2011). Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers. *Mater.Lett*, 65(4), 797-800.

- [9] Tazi, M., Erchiqui, F., Kaddami, H., Ajji, A. (2014). Characterization of rheological and thermophysical properties of HDPE-wood composite. *J.Appl. Polym. Sci*, 131(13).
- [10] Saheb, D. N. et Jog, J. P. (1999). Natural Fiber Polymer Composites: A Review. *Polymer Engineering Group, Chemical Engineering Division, National Chemical Laboratory*, 18(4).
- [11] Bos, H. L. (2004) The potential of flax fibers as reinforced for composite materials. PhD dissertation. *Technische Universiteit Eindhoven*. P 79-89.
- [12] Agarwal, U.P. (2006). Raman imaging to investigate ultrastructure and composition of plant cell walls: distribution of lignin and cellulose in black spruce wood. *picea mariana. Planta*. 224, 1141-1153.
- [13] Charlet, k., Baley, C., Morvan, C., Jernot, J.P., Gomina, M., Bréard, J. (2007) Characteristics of Hermès flax fibers as a function of their location in the stem and properties of the derived inidirectional composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf*, 38(8), 1912-1921.
- [14] Charlet, K., Jernot, J.-P., Gomina, M. (2010). Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibers. *Ind. Crops Prod*, 32(3), 220-224.
- [15] Ibarra, L. (1994). Dynamic properties of short fiber-epdm matrix composites as a function of strain amplitude. *Journal of Applied Polymer Science*, 54(11).
- [16] Gu, R. et Kokta, B. V. (2010). Mechanical properties of pp composites reinforced with BCTMP aspen fiber, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 23(4), 513-542.
- [17] Gu, R. et Kokta, B. V. (2009). Effect of variables on the mechanical properties and maximization of polyethylene-aspen composites by statistical experimental design. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 22(6), 633-649.
- [18] Hsueh, C.-H. (1989). Analytical analyses of stress transfer in fibre-reinforced composites with bonded and debonded fibre ends . *Journal of materials science*, 24(12), 4475-4482.

- [19] Epstein, M, Shishoo, R.L. (1995). Studies of the effect of fiber surface and matrix rheological properties on nonwoven reinforced elastomer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 57(6), 751-765.
  
- [20] Mejri, M., Toubal, L., Cuilliere, J.C, François, V. (2017). Fatigue life and residual strength of a short- natural-fiber-reinforced plastic vs Nylon. *Compos. Part B Eng*, 110, 429-441.
  
- [21] Raj, R.G., Kokta, B.V., Daneault, C. (1990). Wood flour as a low-cost reinforcing filler for polyethylene: studies on mechanical properties. *J. Matter. Sci*, 25(3), 1851-1855.
  
- [22] Alencar, B., Toubal, L., Demagna, K, Fouad, E. (2015) Damage Characterization of Bio and Green Polyethylene–Birch Composites under Creep and cyclic Testing with Multivariable Acoustic Emissions. *Materials* (Basel), 8(11), 7322-7341.
  
- [23] Maiti, S.N., Singh, K. (1986). Influence of wood flour on the mechanical properties of polyethylene. *J.Appl. Polym. Sci. Techno*, 32(3), 4285-4289.
  
- [24] Stark, N.M, Rowlands, R.E. (2003) Effect of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and fiber science*. 35(2), 167-174.
  
- [25] Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K., Krause, C.Wolcott. (2008) Effect of fiber length on processing and properties of extruded wood-fiber/HDPE composites. *J.Appl.Polym*, 110(2), 1085-1092.
  
- [26] Bengston, M., Gatenholm, P., Oksman, K. (2005). The effect of crosslinking on the properties of polyethylene/wood flour composites. *Compos. Scie. Technol*, 65(10), 1468-1479.
  
- [27] Lu, N., Oza, S. (2013). A comparative study of the mechanical properties of hemp fiber with virgin and recycled high density polyethylene matrix. *Compos. Part B Eng*, 45(1), 1651-1656.

- [28] Elouaer, A. (2011). Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales. Thèse, Reims, Université de Reims champagne-ardenne.
- [29] Li, H., Sain, D. M. M. (2003) High Stiffness Natural Fiber-Reinforced Hybrid Polypropylene Composites. *Polym.-Plast. Technol.Eng*, 42(5), 853-862.
- [30] ASTM D 256–10<sup>e</sup>. Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.
- [31] Dominguez, C., Aroca, M., Rodriguez, J. (2006) Izod impact tests of polypropylenes : the clamping pressure influence. *Departamento de Tecnología Química y Ambiental, Universidad Rey Juan Carlos, Mo'stoles, Madrid, Spain*. 25(1), 49-55.
- [32] Keledi,G., Sudár,A., Burgstaller, Ch., Renner,K., Móczó,J. etPukánszky, B. (2012). Tensile and impact properties of three-component PP/wood/elastomer composites. *Express Polymer Letters*, 6(3), 224-236.
- [33] Li H.J, Sain M. M. (2003). High stiffness natural fiber-reinforced hybrid polypropylene composites. *Polym Plast Technol Eng*, 42(5), 853-862.
- [34] Thumm, A., Dickson, A. R. (2013). The influence of fibre length and damage on the mechanical performance of polypropylene/wood pulp composites. *Composites Part A*, 46, 45-52.
- [35] Dickson, A. R., Even, D., Warnes, J. M., Fernyhough, A. (2014). The effect of reprocessing on the mechanical properties of polypropylene reinforced with wood pulp, flax or glass fibre. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 61, 258-267.
- [36] Bravo, A. (2017). Étude de l'endommagement thermomécanique des pièces en bioplastiques et composites de fibres naturelles : application aux engrenages. Thèse. Trois rivières. Université du Québec à Trois Rivières, 251 p.

- [37] Akata, E., M. T., Altınbalık, Y. C. (2003). Three-point load application in single tooth bending fatigue test for evaluation of gear blank manufacturing methods. *International Journal of Fatigue*, 26(7), 785-789.
  
- [38] Gasparini, G., Mariani, U., Gorla, C., Filippini, M., Rosa, F. (2009) Bending Fatigue Tests of Helicopter Case Carburized Gears: Influence of material, Design and Manufacturing Parameters. *In: Proceedings of AGMA Fall technical Meeting*.
  
- [39] D.Koffi. (2006). Ingénierie assistée par ordinateur et nouveaux matériaux. *Timisoara. Romanie*. 9-48.
  
- [40] Guide d'utilisation de la camera CCD : Strain Master Digital Image Correlation Systems Shape, Displacement and strain. Lavision INC. Pages 20.



# ANNEXE A

Pour 0 % de fibres.

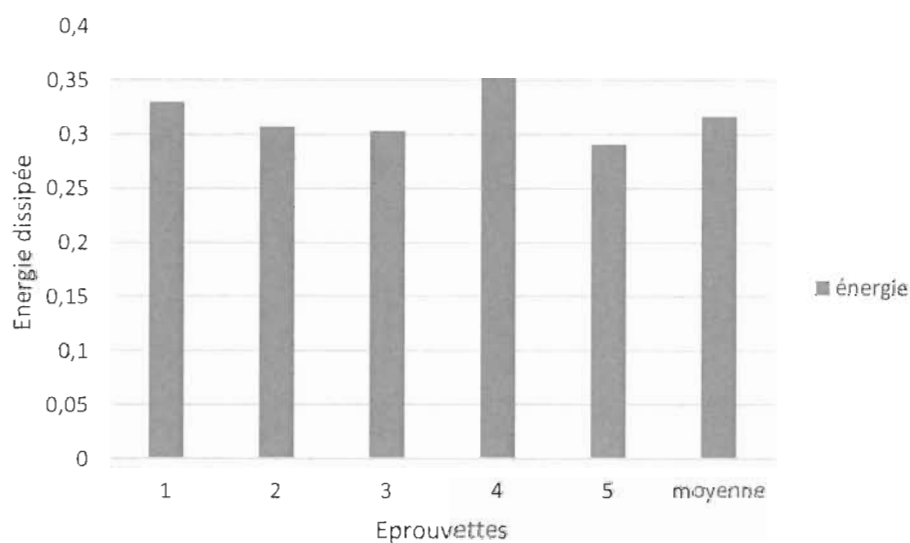


Figure 42: énergies dissipées dans le cas de 0 % de fibres

Échantillons	Énergie	$\text{kJ/m}^2$
1	0,33	9,64
2	0,307	8,97
3	0,303	8,85
4	0,352	10,28
5	0,291	8,50
moyenne	0,316	9,25
Écart type	0,024	0,71
Ratio	0,077	0,08

Pour 10 % de fibres :

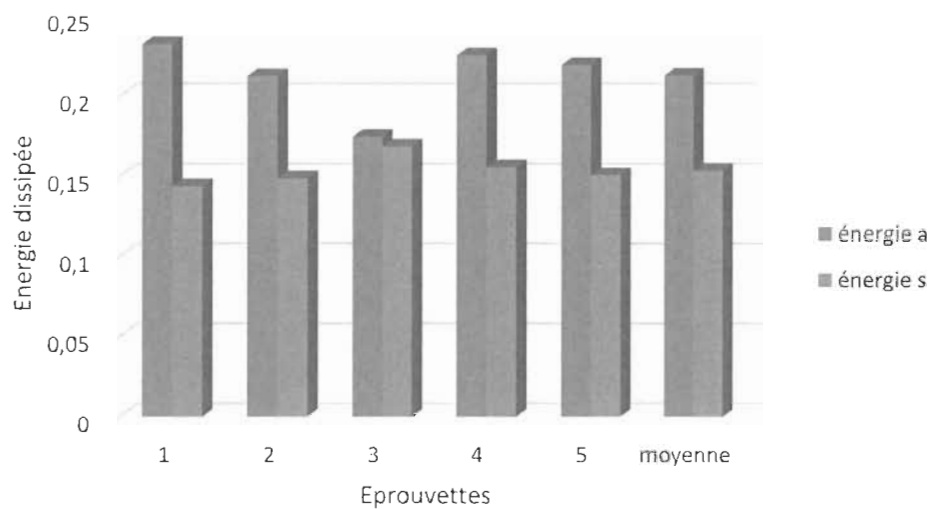


Figure 43 : énergies dissipées dans le cas de 10 % de fibres

Avec agent de couplage :

Échantillons	Énergie	kJ/m <sup>2</sup>
1	0,233	6,80
2	0,213	6,22
3	0,175	5,11
4	0,226	6,60
5	0,22	6,43
Moyenne	0,213	6,23
Écart type	0,023	0,66
Ratio	0,106	0,11

Sans agent de couplage :

Échantillons	Énergie	$\text{kJ/m}^2$
1	0,144	4,21
2	0,149	4,35
3	0,169	4,94
4	0,156	4,56
5	0,151	4,41
Moyenne	0,153	4,49
Écart type	0,01	0,28
Ratio	0,062	0,06

Pour 20 % de fibres :

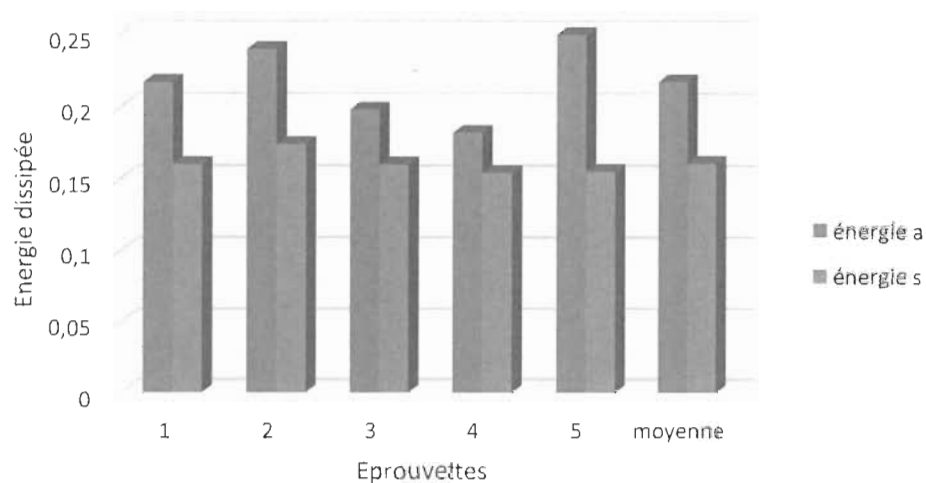


Figure 44 : énergies dissipées dans le cas de 20 % de fibres

Avec agent de couplage :

Échantillons	Énergie	kJ/m <sup>2</sup>
1	0,217	6,34
2	0,24	7,01
3	0,198	5,78
4	0,182	5,32
5	0,25	7,30
Moyenne	0,2174	6,35
Écart type	0,028	0,83
Ratio	0,130	0,13

Sans agent de couplage :

Échantillons	Énergie	$\text{kJ/m}^2$
1	0,16	4,67
2	0,174	5,08
3	0,16	4,67
4	0,154	4,50
5	0,155	4,53
Moyenne	0,161	4,69
Écart type	0,01	0,23
Ratio	0,05	0,05

Pour 30 % de fibres :

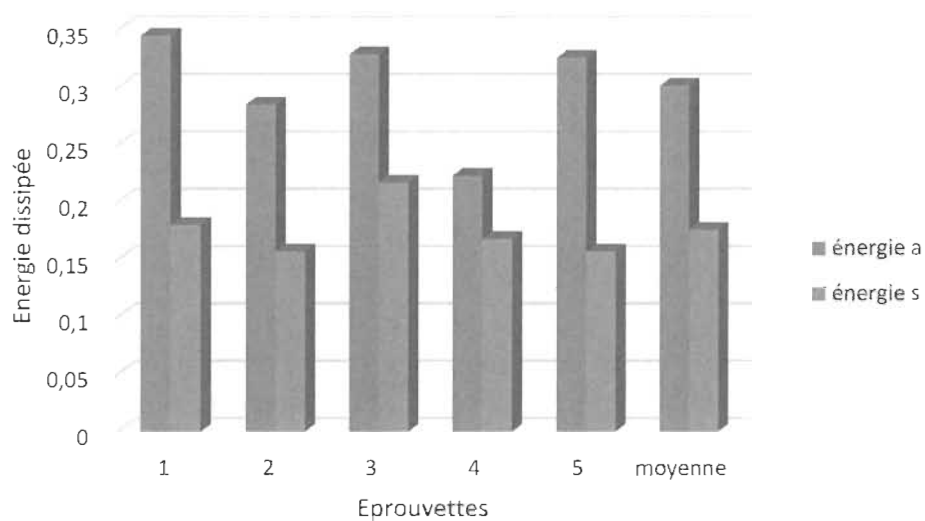


Figure 45 : énergies dissipées dans le cas de 30 % de fibres

Avec agent de couplage :

Échantillons	Énergie	kJ/m <sup>2</sup>
1	0,345	10,08
2	0,285	8,32
3	0,329	9,61
4	0,223	6,51
5	0,326	9,52
Moyenne	0,3016	8,81
Écart type	0,049	1,44
Ratio	0,163	0,16

Sans agent de couplage :

Échantillons	Énergie	$\text{kJ/m}^2$
1	0,18	5,26
2	0,157	4,59
3	0,217	6,34
4	0,168	4,91
5	0,157	4,59
Moyenne	0,1758	5,13
Écart type	0,025	0,73
Ratio	0,142	0,14

Pour 40 % de fibres :

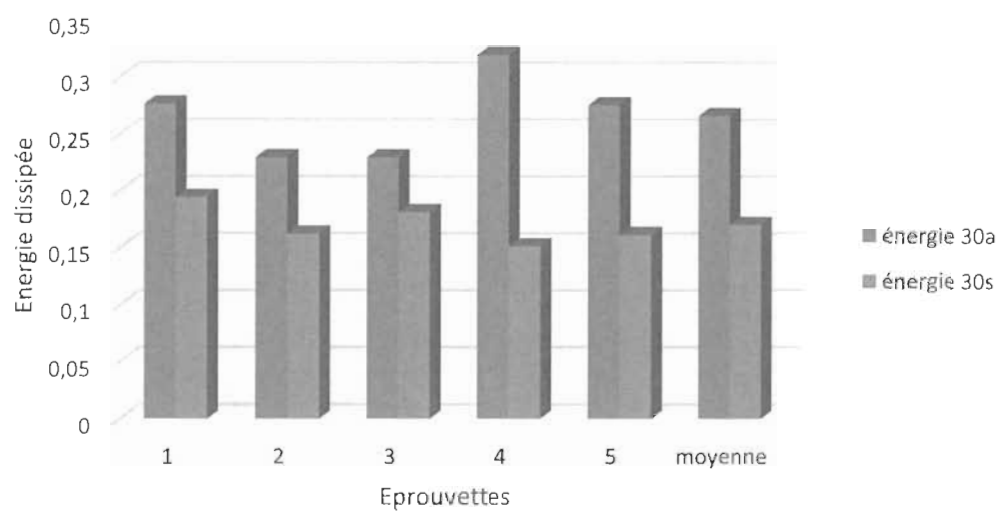


Figure 46 : énergies dissipées dans le cas de 40 % de fibres

Avec agent de couplage :

Échantillons	Énergie	kJ/m <sup>2</sup>
1	0,276	8,06
2	0,229	6,69
3	0,229	6,69
4	0,319	9,32
5	0,275	8,03
Moyenne	0,2656	7,76
Écart type	0,038	1,11
Ratio	0,142	0,14



Sans agent de couplage :

Échantillons	Énergie	$\text{kJ/m}^2$
1	0,194	5,67
2	0,162	4,73
3	0,181	5,29
4	0,151	4,41
5	0,161	4,70
Moyenne	0,169	4,96
Écart type	0,017	0,51
Ratio	0,102	0,10

Pour 20 degré (40 % de fibres avec agent de couplage) :

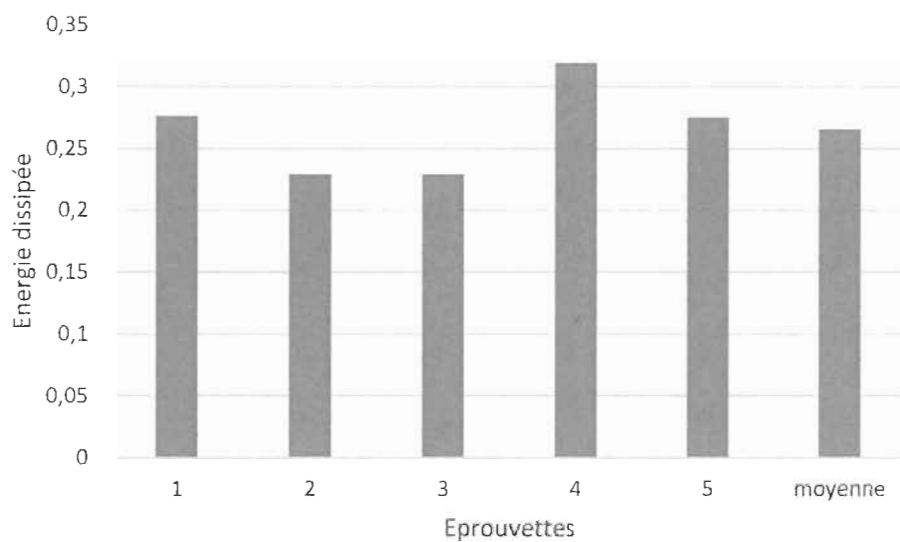


Figure 47: énergie dissipée pour 40 % de fibres à température ambiante

Échantillons	Énergie	kJ/m <sup>2</sup>
1	0,276	8,06
2	0,229	6,69
3	0,229	6,69
4	0,319	9,32
5	0,275	8,03
Moyenne	0,265	7,76
Écart type	0,038	1,11
Ratio	0,142	0,14

Pour 0 degré (40% de fibres avec agent de couplage) :

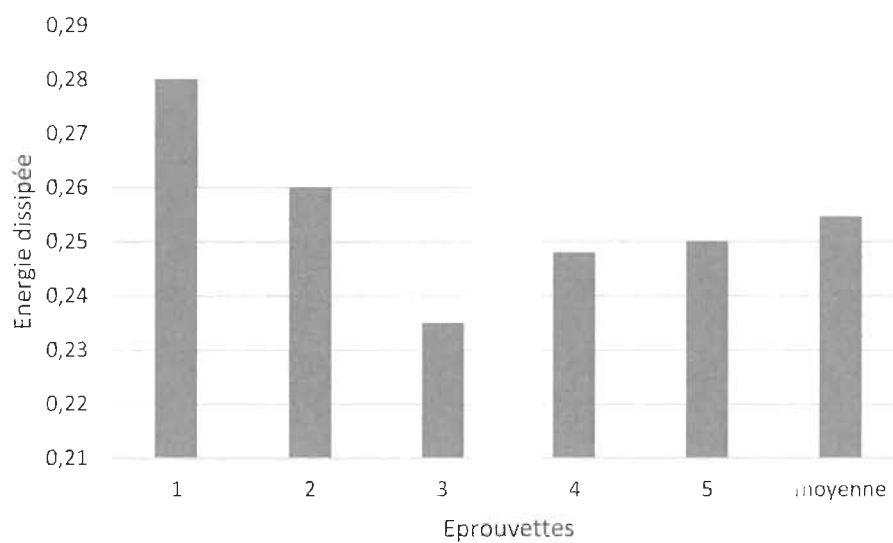


Figure 48: énergie dissipée pour 40 % de fibres à 0 degré

Échantillons	Énergie	kJ/m <sup>2</sup>
1	0,28	8,18
2	0,26	7,59
3	0,235	6,86
4	0,248	7,24
5	0,25	7,30
Moyenne	0,254	7,44
Écart type	0,017	0,49
Ratio	0,066	0,07

Pour -10 degré (40 % de fibres avec agent de couplage) :

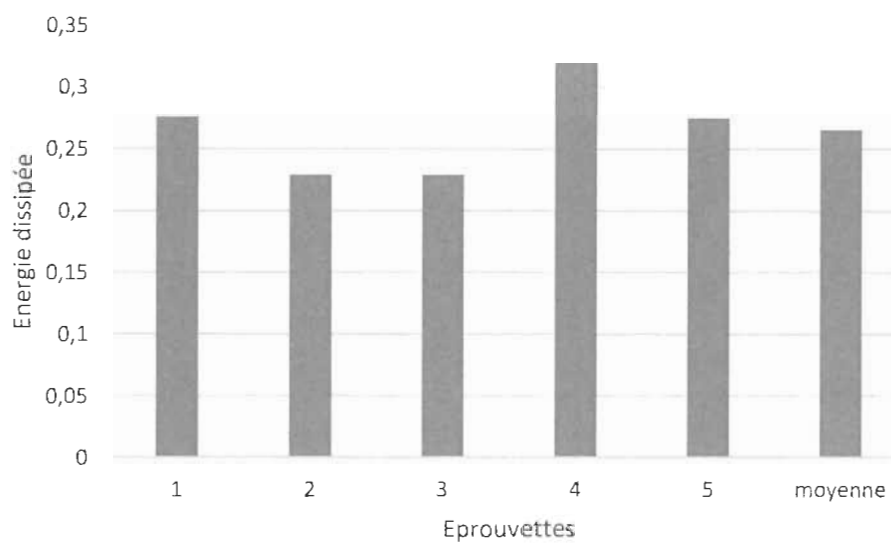


Figure 49: énergie dissipée pour 40 % de fibres à -10 degré

Échantillons	Énergie	kJ/m <sup>2</sup>
1	0,267	7,80
2	0,26	7,59
3	0,242	7,07
4	0,24	7,01
5	0,243	7,10
Moyenne	0,250	7,31
Écart type	0,012	0,36
Ratio	0,049	0,05

## ANNEXE B

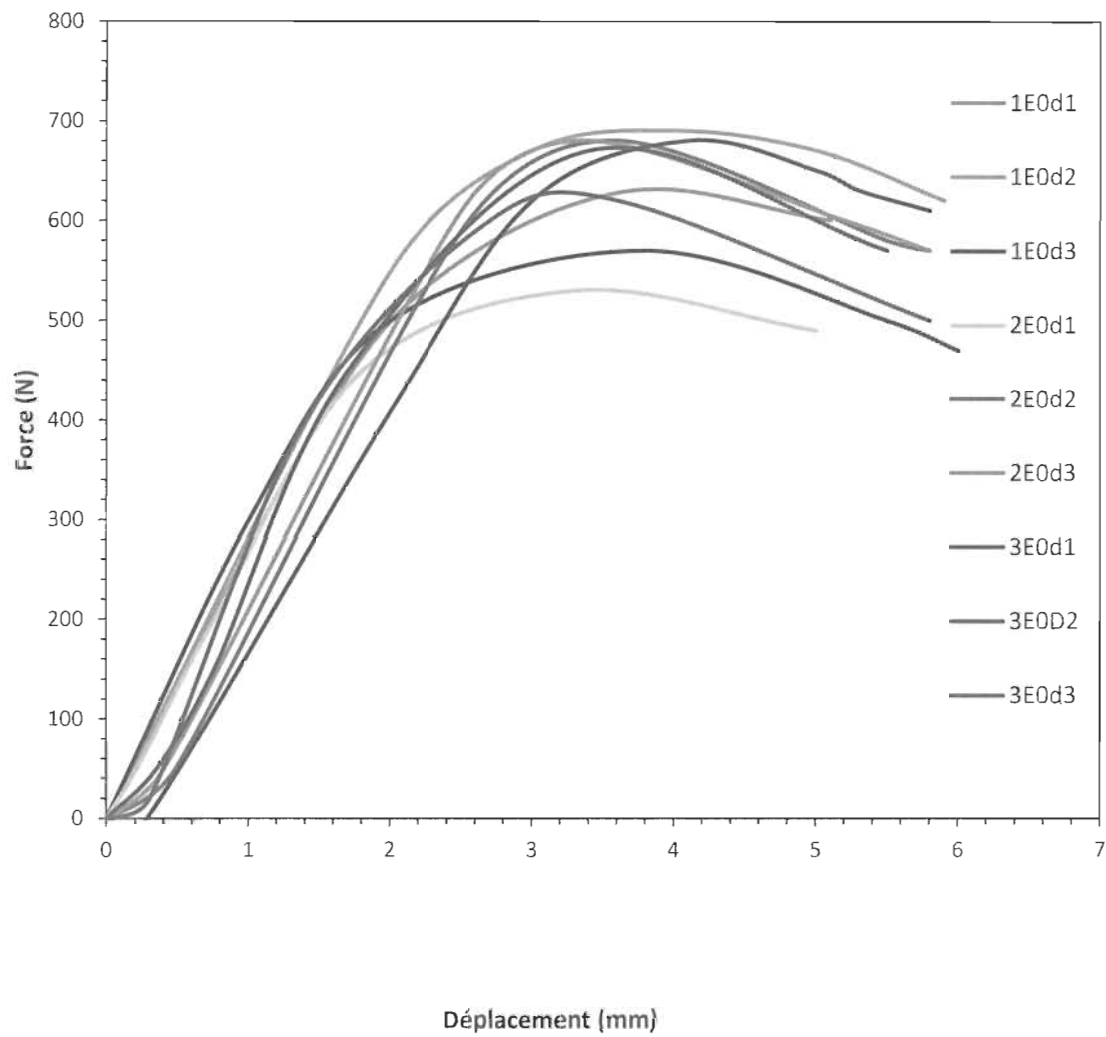


Figure 50: Courbes force-déformation pour les tests de flexion pour le cas de 0 %

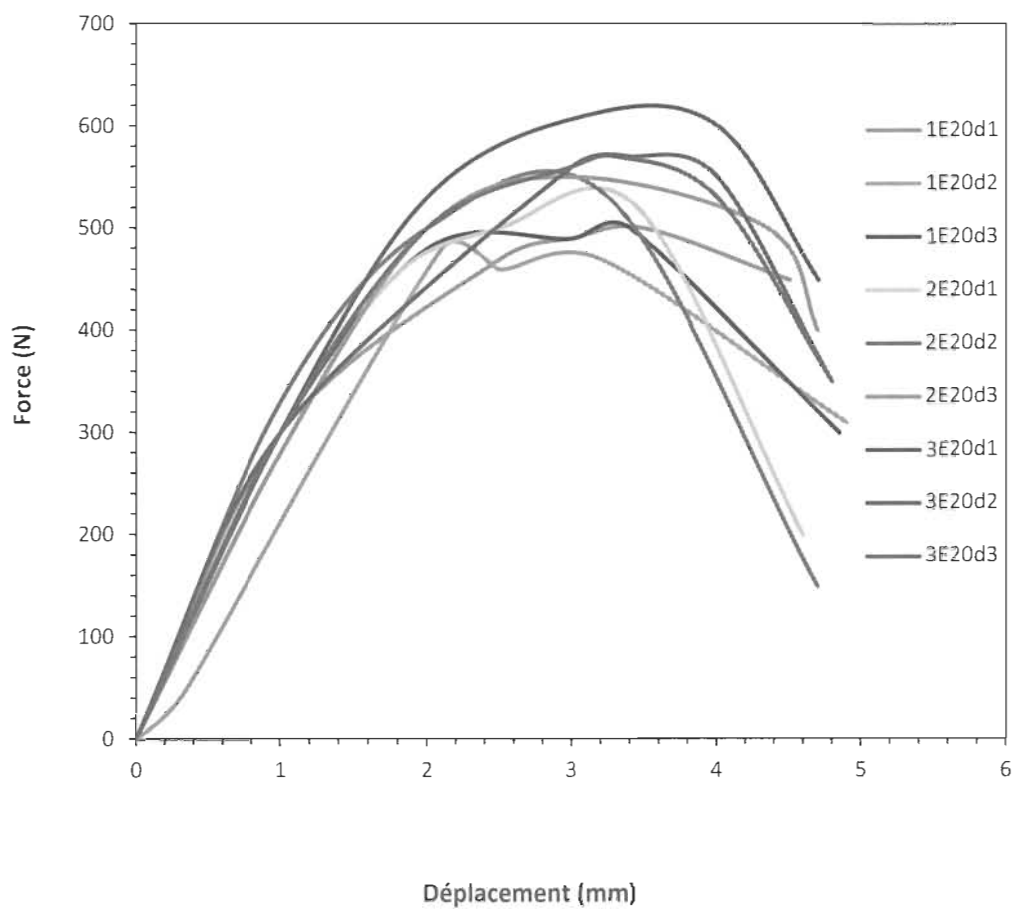


Figure 51: Courbes force-déformation pour les tests de flexion pour le cas de 20 %

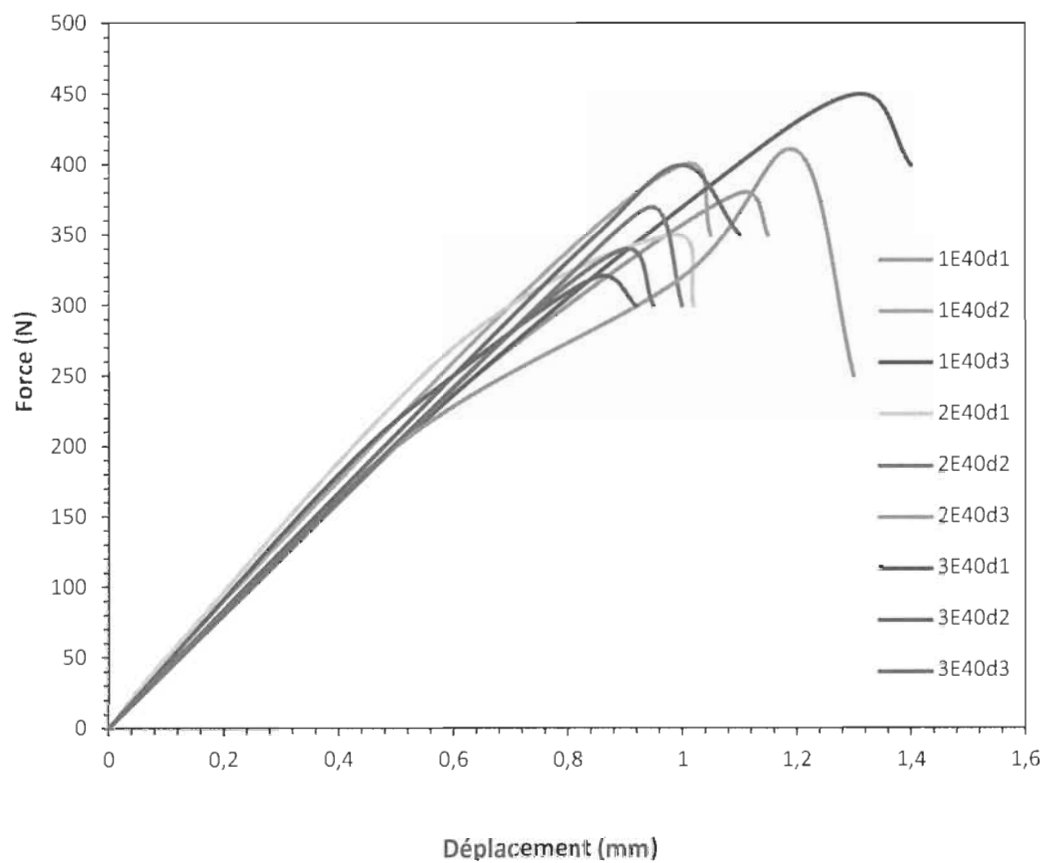


Figure 52: Courbes force-déformation pour les tests de flexion pour le cas de 40 %