

Contribution à l'étude de l'influence des paramètres d'élaboration et optimisation du procédé de mise en œuvre de bio-composites en coques de cotonnier et polystyrène recyclé

Sagnaba SOULAMA^{1,2*}, Kokou Esso ATCHOLI¹, Bétaboalé NAON², Aqil Mousa Kadhim ALMUSAWI¹, Tibi BEDA³ et Samuel GOMES¹

¹ *Institut de Recherche sur le Transport, l'Energie et la Société, Laboratoires IRTEs-SeT/M3M
Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), 90010 Belfort Cedex, France*

² *Laboratoire Groupe d'Etudes et de Recherche en Mécanique, Energétique et Techniques Industrielles (GERME&TI), Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB) 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso*

³ *Département de Physique, Faculté des Sciences, Université de NGaoundéré,
BP 424 NGaoundéré, Cameroun*

*Correspondance, courriel : soulamas2000@yahoo.fr

Résumé

L'élaboration d'un éco-matériau requière outre la caractérisation physico-chimique des matières premières utilisées, la maîtrise des paramètres du procédé de mise en œuvre utilisés. Le présent travail est consacré à l'étude de l'influence des paramètres d'élaboration d'un bio composite injecté en coques de cotonnier et polystyrène recyclé, en vue d'optimiser le procédé de mise en œuvre et les propriétés du produit fini. Dans la démarche d'élaboration adoptée, deux procédés sont retenus : il s'agit de l'extrusion, qui est utilisée pour l'élaboration du compound et de l'injection-moulage (des granulats issus de l'extrusion), utilisée pour fabriquer les éprouvettes et les produits finis. L'objectif visé est d'identifier les valeurs optimales des paramètres de mise en œuvre de ces deux procédés en vue de l'élaboration des produits de qualité ayant notamment les propriétés mécaniques requises pour des applications diverses. Ainsi, après identification des paramètres optimisés de mise en œuvre, des éprouvettes ont été produites avec ces paramètres optimisés d'élaboration et leurs propriétés mécaniques telles que: le module d'élasticité (E) ou module de Young, la contrainte à la rupture (σ_r), Le module d'élasticité en torsion ou module de cisaillement (G), les contraintes de traction, La résistance à l'impact du matériau appelée encore résilience (R), déterminés par les essais de caractérisation et le meilleur matériau élaboré, identifié. Les résultats obtenus sont consignés dans le présent document à travers les courbes, tableaux et figures qui suivent.

Mots-clés : *extrusion, injection, polystyrène recyclé/coques de cotonnier, paramètres d'élaboration.*

Abstract

Contribution to the study of the influence of parameters to formulation and optimization of process implementation of bio-composite at cotton hulls and recycled polystyrene

The development of an eco-material requires further physico-chemical characterization of raw materials, control parameters of process of implementation used.

This work is devoted to the study of the influence of processing parameters of a biocomposite injected cotton hulls and recycled polystyrene, in order to optimize the process of implementation and the properties of the final product. In the development process adopted, two methods are used: this is extrusion, which is used for the preparation of the compound and injection molding (aggregates from extrusion), which is used for fabricate specimens and final products. The objective is to identify the optimal parameter values for the implementation of these two methods for the development of quality products including having the required mechanical properties for various applications. Thus, after identification of optimized parameters for implementation, test pieces were produced with the optimized parameters and mechanical properties as: the modulus of elasticity (E) or Young's modulus, the breaking stress (σ_r) the torsional spring or shear modulus (G), tensile stresses, the impact resistance of the material, also called resilience (R), determined by testing and characterization of the material produced better identified. The results obtained are reported in this paper through the curves, tables and figures that follow.

Keywords : *extrusion, injection, recycled polystyrene / cotton hulls, seed processing parameters.*

1. Introduction

La culture du coton est l'une des principales activités des agriculteurs au Burkina Faso. Le Burkina est classé premier producteur africain de coton en 2013, et produit en moyenne 500 000 tonnes de coton par an. Cependant l'industrie d'égrenage du coton génère d'importants résidus d'égrenage issus des usines. Ces résidus d'égrenage encore appelés «les coques de cotonnier et linter» représentent environ 30% du volume traité et ne sont ni transformées ni valorisées, mais souvent brûlées soit comme énergie de chauffe ou pour s'en débarrasser ; ce qui engendre des problèmes d'ordre environnemental d'effets de serre et de pollution par la production importante du CO₂ dégagé. En outre, le rejet important dans la nature de matières plastiques usagées comme le polystyrène, constitue également une autre menace pour l'homme et son environnement. L'objectif de la présente étude est de collecter, puis transformer les plastiques usagés et les résidus issus de l'égrenage du coton pour produire de nouveaux matériaux en vue de la conception de divers produits utilitaires. L'utilisation des fibres végétales dans un matériau composite n'est pas un concept nouveau.

En effet, l'incorporation de fibres végétales (bois, lin, chanvre) dans les matériaux thermoplastiques ou thermodurcissables en remplacement des fibres de verre [1,2] est un concept déjà industrialisé et commercialisé. De nombreux produits ont été réalisés et fonctionnent déjà dans plusieurs secteurs d'activité tels que l'automobile, le génie civil, l'emballage, l'industrie, etc. Les charges et renforts sont le plus souvent utilisés dans les composites industriels pour améliorer les propriétés du polymère et/ou permettent de diminuer les coûts [3,4]. Ces dernières années les charges et renforts d'origine organique (sciure de bois, fibres végétales) sont devenus de sérieuses alternatives aux charges minérales grâce à leur faible densité, leur recyclabilité, leur origine renouvelable et leur biodégradabilité [5,6]. Toutes ces qualités suscitent un grand intérêt chez les industriels et en particulier dans le secteur automobile qui affiche une volonté de plus en plus forte d'éco-conception dans leurs produits. C'est par exemple le cas de PSA qui veut porter à 30% en masse des matières plastiques la part des matériaux verts (20% de recyclé et 10% de biomasse) dans un véhicule en 2015 [7]. Les fibres végétales offrent des capacités de renforcement intéressantes tout en permettant un meilleur bilan environnemental grâce à un allègement de poids des pièces et à une plus faible consommation énergétique pour l'obtention des fibres [8,9]. Les propriétés des fibres végétales dépendent de plusieurs paramètres comme la nature, la variété de la fibre, sa structure, l'angle micro-fibrillaire et son taux de cellulose [10,11].

La fibre de coton (linter de coton) possède des propriétés spécifiques (ratio entre la grandeur mécanique et la masse volumique) intéressantes et cette fibre se prête à l'obtention de composites avec les propriétés mécaniques intéressantes [12]. Dans la démarche d'élaboration adoptée dans cette étude, deux procédés sont retenus : il s'agit de l'extrusion, utilisée pour l'élaboration d'un compound, puis, de l'injection-moulage des granulats issus de l'extrusion, pour l'élaboration des éprouvettes et des produits finis. Dans la littérature la majeure partie des caractérisations des composites se fait sur des échantillons mis en œuvre par injection [13,14]. L'extrusion est généralement liée à la phase de compoundage qui permet de réaliser le mélange des fibres et de la matrice pour la fabrication des granulés. Dans la présente étude, nous allons associer l'évaluation de l'influence des paramètres d'élaboration identifiés dans la démarche globale d'élaboration retenue pour ce matériau. Ainsi pour l'élaboration du bio composite, « en coques de cotonnier et polystyrène recyclé » trois paramètres d'extrusion et trois paramètres d'injection sont retenus. Pour l'extrusion : le profil de température du fourreau de la vis, la vitesse RPM de la vis et la teneur en eau du mélange. Pour l'injection : le profil de température de la vis de plastification, la force de fermeture du moule et le réglage du moule. Le but de cette étude est d'évaluer l'influence de chacun de ces paramètres sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux élaborés dans le but d'identifier les valeurs optimales pour l'élaboration d'un matériau ayant les meilleures propriétés possibles. Dans un premier temps nous avons évalué l'impact du process de fabrication sur la qualité finale des composites en coques de cotonnier et polystyrène recyclé injectés (sur leur microstructure et les propriétés mécaniques atteintes). Ensuite, les composites injectés dans les conditions optimisées de mise en œuvre ont été produits puis caractérisés afin de comparer leurs performances mécaniques à celles des PS.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matières premières

2-1-1. Les résidus d'égrenage ou coques de cotonnier

Les résidus d'égrenage proviennent de l'usine d'égrenage Bobo II de la SOFITEX. Cette usine d'une capacité de 150 000 tonnes, produit environ 45 000 tonnes de résidus d'égrenage par an. La masse volumique des coques de cotonnier est de 0.61 g/cm^3 . Les coques de cotonnier sont débarrassées de la poussière, des cailloux ainsi que les autres contaminants.

2-1-2. Le Polystyrène recyclé pour la matrice du composite

Le polymère utilisé pour la matrice des matériaux composites est un Polystyrène recyclé. Il est issu de la récupération de matériel d'emballage et autres produits plastiques collectés dans la ville de Bobo-Dioulasso. Il représente une quantité importante délaissée dans la nature. Sa masse volumique est de 0.80 g/cm^3 , son module d'élasticité (E) est de 800 MPa et son élongation à la rupture est de 25.52% selon la procédure ASTM D638. Il a une température de fusion de l'ordre de 240°C .

2-1-2-1. Le mélange

La masse volumique du mélange obtenu (Polystyrène recyclé + Coques de cotonnier) est de : $0,68 \text{ g/cm}^3$. Le taux d'humidité du mélange obtenu : pour l'élaboration d'un échantillon de 3.502g, on apporte 0.26g d'eau soit un taux d'humidité de 7%. À l'aide de ce polymère et des coques de cotonnier, quatre types de formulations ont été réalisées avec respectivement un ratio massique en coques de cotonnier de 10%, 15%, 20% et 30% pour élaborer des composites.

2-1-2-2. Appareils utilisés

- Four pour séchage : Les coques de cotonnier et des granulés ont été séchés à une température de 90°C pendant 24 heures dans un four de marque Heraeus K114.
- Microscope : Les fractures des échantillons issus de l'essai d'impact ont été observées au microscope Nikon Multizoom AZ100.
- Broyeur mélangeur : Le broyeur utilisé pour le broyage et le malaxage du mélange coques de cotonnier et polymère est un broyeur à couteaux.
- Alimentateur de polymère (la matière) : L'alimentateur de polymère utilisé pour alimenter l'extrudeuse en mélange Polystyrène + Coques de cotonnier est une trémie gravimétrique.
- Extrudeuse : L'extrudeuse utilisée pour le mélange du polymère et des coques de cotonnier est une extrudeuse bi-vis corotative de marque Leistritz et de modèle ZSE-27 (L/D - 40).
- Granulateur : L'appareil utilisé pour découper l'extrudât en granulés est de marque Conair et de modèle model 304. Il a été réglé à une vitesse de 4,50m/s.
- Presse à injection : La presse à injection utilisée pour mouler les éprouvettes et échantillons est une presse à injection de marque ARBURG 370 S 700-70. La presse a été opérée avec un profil de température de 160/175/175/175/180/180/180/180°C et une pression maximale d'injection de 2500 bars. Elle a une force de fermeture de 700KN, et est munie d'un système d'éjection hydraulique avec un diamètre de la vis 150mm et 180mm ; Sa puissance électrique de 15 KW.
- Appareil pour la mesure de la masse volumique : L'appareil utilisé pour les tests de masse volumique est un pycnomètre de marque Mettler TOLEDO conformément à la NORME : NF T 51 063 – B.
- Balance d'humidité pour la mesure de l'humidité dans le melange : L'appareil utilisé pour la mesure de l'humidité du mélange est une balance de marque Mettler TOLEDO
- Appareils pour les analyses de résistance à la traction et à la flexion : Les appareils utilisés pour les tests mécaniques de traction et de flexion sont de marque TXAi, EXPONENT STABLE MICRO SYSTEMS LTD et TA-XT2i Texture Analyser. Pour les essais de traction et de flexion, une vitesse de l'ordre de 1 mm/min a été utilisée. Les résultats présentés en traction et en flexion sont les moyennes ainsi que les écarts-types pour les cinq répétitions des essais mécaniques. Les caractéristiques des éprouvettes utilisées sont les suivantes : longueur : 150mm, largeur : 10mm et d'épaisseur : 4mm.
- Appareil pour les analyses de résistance à la torsion : Les essais mécaniques de torsion ont été réalisés sur le banc de torsion de marque Torsiomat C10. Les essais réalisés portent sur 5 échantillons d'éprouvettes normalisées élaborés par injection. La vitesse de déplacement utilisée est de l'ordre de 1 mm/min afin d'avoir suffisamment de points. Les caractéristiques des éprouvettes utilisées sont les suivantes : longueur : 150mm, largeur : 10mm et d'épaisseur : 4mm.
- Appareil pour les analyses de résistance à l'impact : L'essai mécanique d'impact a été réalisé en utilisant les normes ASTM pour un essai d'impact de type Charpy entaillé. L'appareil utilisé pour faire l'entaille est de marque Dynisco et de modèle ASN 120-m. Les entailles faites sont normées selon la norme ASTM D256, soit d'une profondeur de 2,54 mm avec un angle de 22,5 degrés. Par la suite, les essais d'impact ont été réalisés à l'aide d'un appareil de marque Tinius Olsen de modèle Impact 104.

Au total une dizaine d'échantillons rectangulaires de dimensions 12,7 mm par 125 mm de longueur ont été fracturés à température ambiante. La pendule utilisée est celle de 10 Newtons avec une capacité de 15 Joules. Les résultats de la résistance à l'impact sont les moyennes ainsi que les écarts types des répétitions pour chaque composite.

2-2. Méthodes

Les différents procédés de mise en œuvre des matériaux polymères ou composites sont soumis à un respect de certains paramètres. En effet, selon la nature des matrices polymères, les températures, les pressions ainsi que les vitesses constituent des paramètres très importants pouvant affecter certaines propriétés du matériau. La mise en œuvre d'éprouvettes utilisables pour différents types d'essais se divise en deux étapes essentielles dans cette étude : l'extrusion puis l'injection. Les protocoles de mise en œuvre par extrusion puis par injection des composites en coques de cotonnier à matrice en polystyrène recyclé sont présentés à la **Figure 1** à travers le process de fabrication des produits finis.



Figure 1 : Différentes étapes du process de fabrication du matériau biocomposite
Préparation de la matière première

Les coques de cotonnier et le Polystyrène sont tout d'abord broyés ensemble afin de réduire leur dimension à l'aide d'un broyeur à couteaux. Au cours de cette opération le mélange obtenu est séparé de la poussière et des autres contaminants.

Quatre mélanges broyés (Polystyrène+ Coques de cotonnier) ont été élaborés dans les proportions suivantes en vue de la réalisation des échantillons de composites:

Mélange 1	<ul style="list-style-type: none"> - Coques de cotonnier : 720g soit 20% de la masse totale - Polystyrène recyclé : 2880g soit 80% de la masse totale
Mélange 2	<ul style="list-style-type: none"> - Coques de cotonnier : 540g soit 15% de la masse totale - Polystyrène recyclé : 3060g soit 85% de la masse totale
Mélange 3	<ul style="list-style-type: none"> - Coques de cotonnier : 360g soit 10% de la masse totale - Polystyrène recyclé : 3240g soit 90% de la masse totale
Mélange 4	<ul style="list-style-type: none"> - Coques de cotonnier : 1080g soit 25% de la masse totale - Polystyrène recyclé : 2520g soit 75% de la masse totale

Les **Figures 2, 3 et 4** représentent les mélanges broyés obtenus. C'est sous cet aspect que les coques de cotonnier ont été utilisées comme renfort dans le matériau composite.



Figure 2 : *Coques de cotonnier non broyées*



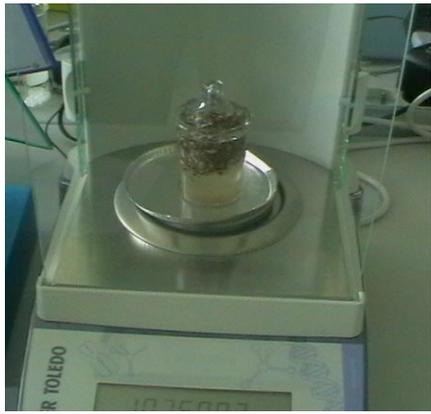
Figure 3 : *Résidus de polystyrène broyé*



Figure 4 : *Mélange de polystyrène et des coques de cotonnier broyé*

Les masses volumiques des matières premières ont été déterminées au pycnomètre conformément à la norme NF T 51 063 – B : Masse volumique coque de cotonnier = 0,61 g/cm³, Masse volumique Polystyrène recyclé = 0,79 g/cm³, Masse volumique mélange (Polystyrène recyclé + Coques de cotonnier) = 0,662 g/cm³.

Tableau 1 : détermination de la masse volumique des coques de cotonnier et du mélange

NOM : SOULAMA Prénom : Sagnaba Date : 12/06/2011		MESURE DE LA DENSITE AU PYCNOMETRE		NORME : NF T 51 063 – B	
CONDITIONS D'ESSAI Température de l'eau : $\rho_{eau} = 1 \text{ g/cm}^3$		CARACTERISTIQUES MATIERE Désignation : coques de cotonnier Forme : Fournisseur : N° de lot :			
m ₁ : masse de l'eau seule		m ₂ : eau + Matière		m ₃ : matière dans l'eau	
					
	Echantillon N°1	Echantillon N°1	Echantillon N°1	Densité	$d = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3}$
m ₁	108.33	108.87	108.79	Masse volumique	
m ₂	110.59	111.53	111.01		$\rho = d \cdot \rho_{eau}$
m ₃	107.49	107.36	107.34	dmoyenne=0.61	$\rho \text{ moyen} = 0.61$
D	0.72	0.63	0.60		
P	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³		
Données fournisseur :					
Dérive/fournisseur : %					
Dérive accepté par le client : %					
Résultat :	Conforme		Non conforme		
Observation :					

Taux d'humidité : il a été déterminé grâce à une balance d'humidité (Figure 5). Soit 0,26g d'eau dans un échantillon de 3,502g d'où un taux d'humidité de 7%



Figure 5 : Balance d'humidité

2-2-1. Extrusion (compoundage) et granulation

Tout d'abord il faut noter que les différentes formulations de dosages nécessaires (*Figures 2, 3 et 4*) ont été réalisées hors extrudeuse sur une balance puis les constituants, mélangés et broyés dans un broyeur-mélangeur à couteaux avant utilisation en extrusion. L'élaboration des granulats appelée compoundage s'effectue sur une extrudeuse où la matière première (Polystyrène recyclé+Coques de cotonnier) est tout d'abord chauffée à l'aide d'une monovis à une température allant de 160°C au pied de trémie à 175°C en tête de filière puis injectée dans une filière ronde de diamètre 3mm. La vitesse de la vis adoptée est de 90trs/mn. On obtient à la sortie de la filière, un profilé rond de diamètre 3mm correspondant au diamètre intérieur de la filière et qui est ensuite refroidi par de l'eau dans un bac puis séché à l'air et découpé sous forme de granulés par un couteau au poste de granulage. La *Figure 6* présente le montage utilisé lors de l'extrusion et la *Figure 7* désigne le compound (granulés) obtenu.

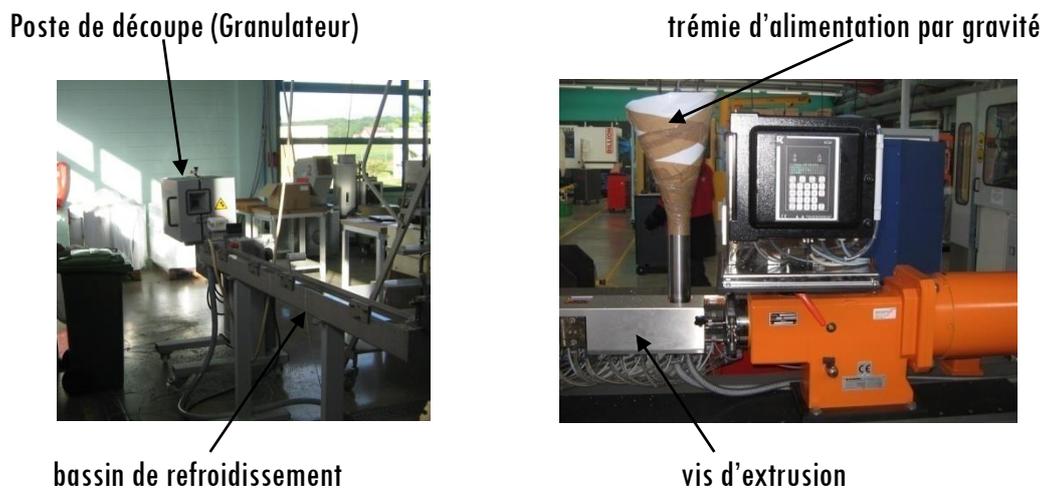


Figure 6 : Montage de l'extrusion



Figure 7 : Granulés

Avant compoundage, les coques ont été séchées pendant 2h à 90°C. Leur taux d'humidité a été contrôlé à l'aide de la balance d'humidité, et vaut 7%.

2-2-1-1. Paramètres pour l'extrusion

L'extrusion d'un biocomposite se décompose en trois étapes principales. Dans un premier temps, les constituants sont convoyés et compactés vers la filière. Ils sont ensuite chauffés jusqu'à la fusion de la matrice polymère. La vis exerce alors un cisaillement et malaxe la matière. Pour que le mélange puisse s'écouler à travers la filière, la pression intérieure augmente. Plus le débit de matière est élevé, plus les pertes de charges sont importantes. Il est donc nécessaire d'augmenter la pression à l'entrée de la filière.

La **Figure 8** représente le schéma d'une extrudeuse ainsi que le chemin suivi par les constituants lors de l'extrusion.

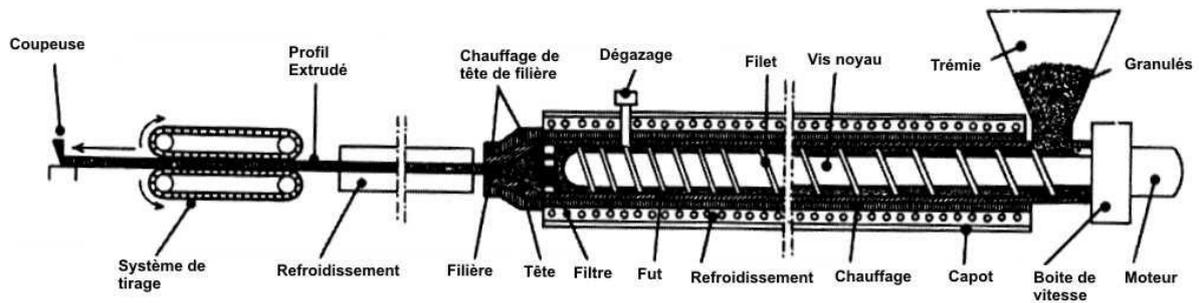


Figure 8 : Schéma d'une extrudeuse

Concernant l'extrusion du biocomposite à matrice en polystyrène recyclé chargée de coques de cotonnier, les différents paramètres d'extrusion identifiés pour une bonne mise en œuvre dans la présente étude sont : la vitesse de vis, le profil de température du fourreau, la quantité d'eau du mélange (PS recyclé/Coques de cotonnier).

2-2-2. Injection des éprouvettes et échantillons

Les granulés obtenus précédemment en extrusion sont utilisés pour produire des échantillons d'éprouvettes requises (**Figure 11**) dans une presse à injection de marque ARBURG 370 S 700-70 (**Figure 9**).

La mise en œuvre par injection permet d'obtenir des géométries d'éprouvettes particulières, en vue des différents essais de caractérisation.



Figure 9 : Presse à Injecter

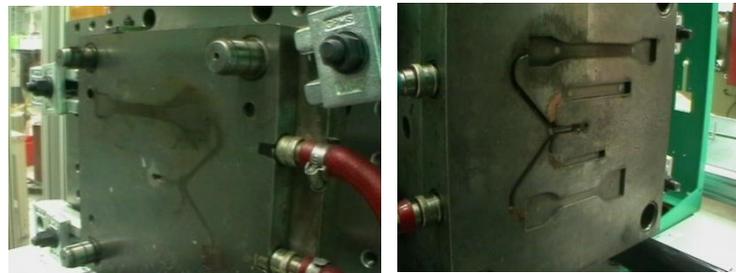


Figure 10 : Empreinte du moule pour éprouvettes



Figure 11 : Eprouvettes de traction injectées avec dispositif d'injection

2-2-2-1. Paramètres pour l'injection

Le procédé de mise en œuvre par injection-moulage se décompose en quatre étapes principales : le dosage de la matière, le remplissage du moule, le refroidissement de la pièce et l'éjection de la pièce. De la même manière que pour l'extrusion, l'injection demande un contrôle des différents paramètres, tels que les températures (chauffage et refroidissement), les pressions (dans le fourreau et le moule) ainsi que les vitesses. En effet, si ces différents paramètres ne sont pas optimisés, nous pouvons constater certains défauts sur les éprouvettes, tels que du retrait important, une concavité sur les faces supérieure et inférieure ou la formation de bulles d'air (ou de gaz) à cœur. Comme l'illustre la **Figure 12** ci-dessous, les moules, installés sur une presse à injection, sont constitués d'une partie fixe et d'une partie mobile. La matière compound (sous forme de granulés) est chauffée et maintenue à une température optimale à l'intérieur d'un fourreau de plastification (2). L'action de la vis d'injection (1) permet de ramollir les granulés de la matière compound sans dégrader les fibres (coques de cotonnier) et de les ramener à un état visqueux jusqu'à la buse d'injection (3). C'est la phase de dosage. Ensuite, vient la phase d'injection dynamique. La matière est injectée à l'intérieur du moule sous une forte pression.

La température du moule doit être réglée et inférieure à la température de transformation de la matière pour que celle-ci puisse se mettre en forme correctement. Une pression constante est appliquée ensuite (phase de maintien) pour continuer à alimenter le moule et éviter le phénomène de retrait de la matière durant son refroidissement. Enfin, la pièce est refroidie avant d'être démoulée (5). Un nouveau cycle peut alors recommencer. De nombreux paramètres doivent être pris en compte en fonction de la matière utilisée, de la qualité et de la production souhaitées. Parmi ceux-ci, on peut citer : la température du moule, celle du fourreau et de la matière, le temps de refroidissement de la pièce, la pression appliquée au moule, la vitesse de rotation de la vis et le dosage de la matière. Le moulage par injection permet d'obtenir des pièces finies de très bonne qualité. Leur aspect dépend essentiellement de la qualité du moule. C'est pourquoi il est nécessaire de faire subir au moule de nombreuses opérations de finition. Comme vu précédemment, l'injection moulage est un procédé très complexe de mise en forme de matières plastiques et d'écomatériaux dont plusieurs paramètres influencent les propriétés finales du produit. Au nombre de ces paramètres nous retiendrons dans cette étude : le profil de température de la vis d'injection (vis de plastification), le dispositif de fermeture du moule et plus spécifiquement la force de fermeture du moule et le moule (aspect conception).

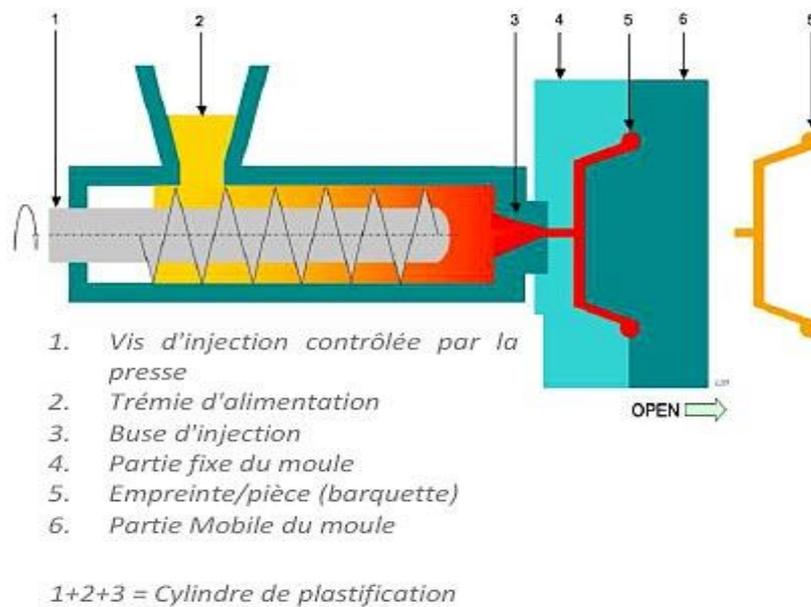


Figure 12 : Schéma de principe du Moulage par injection [Academic]

3. Résultats et discussion

3-1. Micrographie des fibres (coques de cotonnier)

Outre les paramètres d'élaboration liés au procédé et au process, les paramètres matériaux (physico-chimiques comme la longueur des fibres, leur diamètre, les facteurs de formes L/D et les constituants chimiques) influencent également les propriétés finales des composites et ont été déterminés. Des photos prises au microscope optique Nikon (**Figure 13**) permettent de caractériser les fibres (linter de coton) et les coques à travers leurs propriétés dimensionnelles (longueur, diamètre et facteurs de formes L/D). Le **Tableau 2** résume les paramètres dimensionnelles des coques de cotonnier utilisées et le **Tableau 3** donne leur composition chimique.

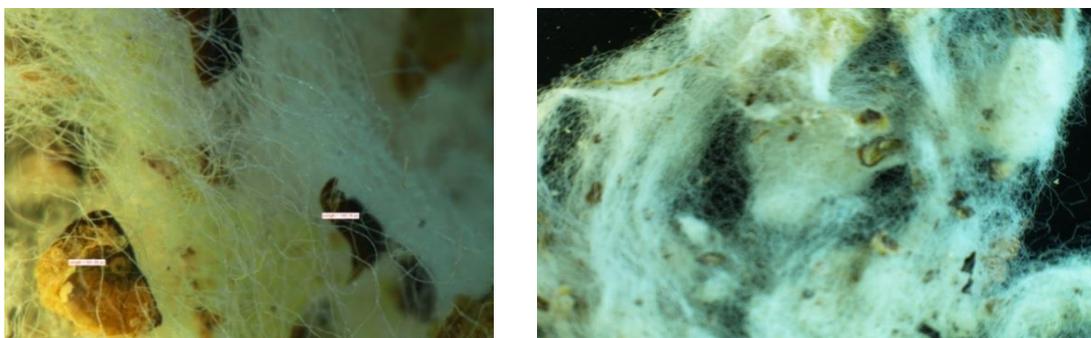


Figure 13 : Observation des coques de cotonnier au microscope optique Nikon AZ100

Tableau 2 : Dimensions moyennes des Coques de cotonnier utilisées

Coques de cotonnier	Longueur (μm)	Diamètre (μm)	Facteur de forme (L/D)
Coques (particules)	605 - 2450	85 – 549	4,46 – 7,12
Linter de coton	2070	18	112,93

La valeur du paramètre facteur de forme (L/D) du linter de coton étant important on peut s'attendre à une amélioration des propriétés mécaniques des composites qui seront élaborés. Ceci peut s'expliquer par le fait que les fibres avec un facteur de forme (L/D) plus élevé possèdent une surface de contact avec la matrice plus importante.

3-2. Caractéristiques physico-chimiques des matières premières

3-2-1. Composition chimique

Tableau 3 : Composition chimique des coques de cotonnier

Coques de cotonnier	Constituants				
	Cellulose (%)	Protéines (%)	Cires (%)	Sucres physiologiques (%)	Autres (%)
Coques de cotonnier	95	1,6	0,9	0,3	2,2

3-2-2. Autres propriétés des coques de cotonnier

Masse volumique $\rho = 1,51\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; Absorption d'eau : 25%; Allongement : 7,1 à 8%; E flexion : 5500 à 12600 MPa; E_T : 287 à 800 MPa.

3-2-3. Propriétés du polystyrène utilisé

Le **Tableau 4** ci-dessous résume les propriétés du polystyrène recyclé utilisé dans cette étude.

Tableau 4 : Propriétés du polystyrène recyclé utilisé dans l'étude

Matériau	Masse volumique g/cm^3 (ISO 1183)	E Flexion (MPa) (ISO 178)	Rm (MPa) (ISO 527-2)	Impact IZOD (KJ/m^2) ISO 180	Allongement (%) (ISO 527-2)
PS recyclé	0,79	800	4,439	23,52	25,52

3-3. Optimisation des paramètres de mise en œuvre par extrusion

L'optimisation du procédé d'extrusion (profil de température de la filière, vitesse de rotation de la vis et taux d'humidité du mélange) est réalisée sur le composite à 20% en coques de cotonnier. Il faut tout d'abord faire remarquer que nous n'avons pas pu opérer avec des mélanges en teneur de coques de cotonnier supérieurs à 20% sur l'extrudeuse par ce qu'au delà de cette valeur, lorsque le mélange broyé est introduit dans la trémie, les coques, au lieu d'être entraînées par la vis, ont plutôt tendance à remonter dans la trémie sous l'action de vis de plastification du fait probablement de leur faible densité.

Ce qui ne permet pas l'obtention d'un extrudât homogène et de bonne qualité. Par ailleurs il faut aussi signaler la présence d'une bonne senteur (odeur) qui se dégage durant les opérations d'extrusion et d'injection et qui est probablement liée à la fusion ou dégradation de certains enzymes ou composés contenus dans les coques de cotonnier.

3-3-1. Influence de la vitesse de la vis d'extrusion

La vitesse de vis est un paramètre qui influence très peu les propriétés du produit final. Toutefois, celle-ci doit être ni très faible pour éviter un temps de séjour trop long, qui peut entraîner la dégradation de la fibre (coques de cotonnier) (Glenn et al., 2001) ni trop élevée pour éviter une fusion partielle du polystyrène. Dans notre étude, l'influence de la vitesse de la vis a été évaluée, en la faisant varier de 20 à 120 rpm au cours de plusieurs essais et pour différentes formulations, pour finalement retenir la vitesse de 90 rpm qui donne un extrudât homogène et de bonne qualité et de couleur gris sombre. Le **Tableau 6** résume les résultats obtenus. Ainsi au cours de cette étude, on a observé que pour une vitesse de vis égale à 30 rpm, il se produit une dégradation partielle de la fibre (brûlure).

Tableau 6 : influence de la vitesse de la vis d'extrusion sur la qualité de l'extrudât

Coques de coton + Polystyrène (% poids)	Vitesse de vis (RPM)	Débit total de composite (kg/h)	Constatations sur le produit fini à la sortie de l'extrudeuse
20%	120	12.5	Présence de particules de polystyrène non fondus
20%	100	10.8	Présence de particules de polystyrène non fondus
20%	90	8	Bonne qualité de l'extrudat avec une structure plus homogène
20%	70	5	Pas de dégradation des coques de cotonnier. La structure paraît homogène
20%	30-50	3	Dégradation (brûlure) des fibres. Structure de l'extrudat non homogène avec une couleur marron foncé.

Pour des valeurs de rpm comprises entre 50 et 70, le débit de composite semble faible et on constate que l'extrudât obtenu est d'une couleur marron foncé. Lorsque rpm est supérieure à 90, le polystyrène n'est pas entièrement fondu du fait probablement du temps de séjour très court de la matière dans la vis et l'extrudat obtenu n'est pas homogène. Par ailleurs, nous remarquons que la qualité finale de l'extrudat obtenu n'est pas influencée par les différentes teneurs en fibres.

3-3-2. Influence du profil de température de la vis d'extrusion

Nous avons fait varier la température entre 100 et 185°C afin de déterminer le profil de température adapté à l'élaboration du produit. Pour commencer, nous avons choisi le profil de température du **Tableau 7**.

Tableau 7 : Profil 1 de température extrudeuse

	Fourreau								Filière	
Zone	1	2	3	4	5	6	7	8		
Température (°C)	160	160	160	160	170	170	170	170	170	170

Avec ce profil de température, l'extrusion était difficile. La matière en sortie n'était pas homogène et deux phases étaient visibles. Une phase contenait les coques et du polystyrène fondu alors que l'autre contenait le polystyrène sous forme de broyats non fondus. La présence de ces particules de polystyrène non fondu indique que la température des trois zones de chauffage entête de l'extrudeuse n'était pas assez élevée pour permettre la fusion de la totalité de polystyrène qui a été entraîné à l'intérieur du fourreau. Le deuxième profil de température adopté au **Tableau 8** par la suite, a permis de fondre le polystyrène mais on a constaté une dégradation (brûlure des coques de cotonnier) à la sortie de la filière. Or dans cette phase d'élaboration, seul le polystyrène doit fondre et les coques de cotonnier doivent restées intactes.

Tableau 8 : Profil 2 de température extrudeuse

	Fourreau								Filière	
Zone	1	2	3	4	5	6	7	8		
Température (°C)	175	175	180	180	180	185	185	185	185	185

Après plusieurs essais, le profil de température testé au **Tableau 9** a permis la fusion complète du polystyrène dans la zone prévue tout en préservant les coques de cotonnier intactes, et donc l'obtenir un produit de structure homogène. A la sortie de l'extrudeuse, l'extrudât présente un aspect gris sombre du fait probablement de la présence des coques et fibres à l'intérieur. Ce matériau a une structure plus homogène. Le profil de température (pour les zones de chauffage de 1 à 8) est bien adapté pour l'extrusion de notre matériau (il n'y a pas de dégradation des coques de cotonnier au cours de l'extrusion).

Tableau 9 : Profil optimisé de température de l'extrudeuse

	Fourreau								Filière	
Zone	1	2	3	4	5	6	7	8		
Température (°C)	170	170	170	170	175	175	175	175	175	175

3-3-3. Influence de la variation de la teneur d'eau dans le mélange

On a fait varier la teneur d'eau dans le mélange de 7% à 10% et le meilleur résultat a été obtenu avec la teneur de 7% d'eau dans le mélange. C'est cette valeur qui a été adoptée pour l'ensemble des formulations utilisées dans cette étude. Il faut signaler également que le dosage du mélange a été opéré hors extrusion au moment du broyage qui a précédé l'extrusion. Par ailleurs nous n'avons pas pu opérer avec des mélanges en teneur de coques de cotonnier de plus de 20% sur l'extrudeuse par ce qu'à partir de cette valeur de 20% de teneur en coques dans le mélange broyé, lorsque la matière est introduite dans la trémie, les coques, au lieu d'être entraînées par la vis, ont tendance à remonter dans la trémie sous l'action de vis de plastification du fait probablement de leur faible densité ou masse volumique.

Ce qui conduit à un extrudât non homogène et de mauvaise qualité. En outre, il faut aussi noter le dégagement d'une bonne senteur (odeur) durant les opérations d'extrusion et d'injection et qui est probablement liée à la fusion ou dégradation de certains enzymes ou composés contenus dans les coques de cotonnier. Les conditions opératoires utilisées pour l'extrusion sont résumées au **Tableau 2**. L'extrudeuse possède huit zones de températures et le profil de température optimisé retenu dans notre travail est le suivant : 160/170/170/170/175/175/175/175°C en partant de la zone d'alimentation du mélange et en terminant par la filière. Le matériau, à la sortie de la filière, est refroidi dans un bassin d'eau puis découpé en granulés par un couteau sur un poste de découpe.

3-4. Optimisation des paramètres de mise en œuvre par injection moulage

3-4-1. Influence du profil de température de la vis d'injection

Un profil de température adéquat au niveau de la vis d'injection ou de plastification doit permettre de fondre les granulés sans endommager la matière, notamment, les fibres végétales. Après un premier profil de température adopté au **Tableau 10** où les résultats n'ont pas été concluants, car la matière a brûlé par endroit, nous sommes parvenus après plusieurs essais, au bon de profil de température pour injecter par moulage les éprouvettes et échantillons de qualité requise. Ce profil de température est donné dans le **Tableau 11** ci-dessous.

Tableau 10 : *profil 1 de température pour l'injection*

	Vis							
Zone	1	2	3	4	5	6	7	8
Température (°C)	175	175	175	180	180	200	200	200

Tableau 11 : *profil 2 de température retenu pour l'injection*

	Vis							
Zone	1	2	3	4	5	6	7	8
Température (°C)	175	175	175	180	180	180	180	180

Avec ce profil de température, les différentes éprouvettes ont été injectées en vue des essais de caractérisation du matériau plus tard. Il est à noter qu'au cours des essais sur la recherche de profil de température adapté, nous sommes tombés sur un cas de profil de température trop élevée et cela s'est traduit par une brûlure de la matière injectée dans le moule et la présence « d'un coup de feu ». Le coup de feu se présente sous l'aspect d'une tâche grise ou noire très localisée sur la pièce, ou sur le moule ; cette dégradation locale rend parfois la matière un peu collante. Le coup de feu génère souvent un bruit sec parfaitement audible lors de l'injection. La **Figure 14** du moule montre l'aspect de ce dernier après un coup de feu survenu lors de l'injection des éprouvettes.

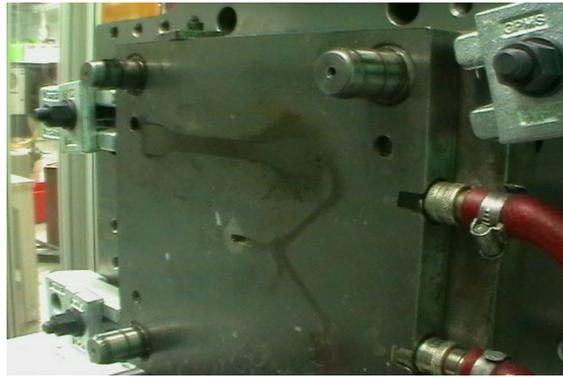


Figure 14 : Empreinte du moule suite « à un coup de feu »

Ce phénomène est dû au fait que durant le remplissage, les gaz, contenus dans l'empreinte ou produits par la matière, sont insuffisamment évacués. A la fin du remplissage, leur brusque montée en pression fait augmenter leur température, provoquant la dégradation de la matière. Le mélange gazeux produit s'enflamme spontanément de manière explosive. Le coup de feu se situe en général en fin de remplissage, sur la zone d'arrêt du front d'écoulement de la matière. Les Causes possibles sont:

- ✓ Machine/moule : Events insuffisants
- ✓ Méthode : T° matière ou outillage trop élevées.
- ✓ Vitesse d'injection trop élevée
- ✓ Force de fermeture trop élevée
- ✓ Milieu : Events colmatés (nettoyer le moule)

Dans notre cas c'est la température de matière qui est incriminée (car trop élevée), et le choix d'un profil de température adapté (profil 2) a permis de résoudre le problème.

3-4-2. Influence de la force de fermeture du moule

Le rôle du groupe de fermeture est de permettre de monter le moule sur la presse et de rendre possible son ouverture et sa fermeture. Ce groupe comprend deux plateaux : l'un est mobile, l'autre est fixe. La partie mobile, peut se déplacer à des vitesses et courses très différentes. Le groupe sert aussi à appliquer la force de fermeture et à centrer les deux parties du moule lors de la fermeture. La force de fermeture est la force nécessaire pour maintenir les deux parties du moule fermées pendant son remplissage sous haute pression. C'est un paramètre important pour la conduite efficace de l'injection. Cette force, par conséquent, doit être plus grande ou au moins égale à celle qui résulte de l'application à l'intérieur du moule d'une pression de remplissage ou d'injection. On peut donc écrire, en première approximation, en considérant que la pression dans l'empreinte est uniforme : Force de fermeture (kgf) \geq surface projetée (cm²) \times pression (kgf/cm² ou bar). Avec : 1 kgf \approx 10 N; 1 kgf/cm² \approx 10⁵ Pa. Dans notre cas, la force de fermeture appliquée a été déterminée et vaut 250 bars.

3-4-3. Influence de la conception du moule

La dernière condition à remplir est le parfait guidage des deux parties du moule, qui doivent rester centrées l'une par rapport à l'autre non seulement lors de la rencontre des plans de joint du moule mais aussi quand la répartition de la pression de remplissage n'est pas symétrique, ce qui pourrait avoir pour effet de déplacer une partie du moule par rapport à l'autre. Cette dernière exigence doit obligatoirement être prise en compte pendant la conception du moule par le concepteur.

Enfin il faut noter que la qualité finale des produits dépend également des opérations de finitions sur le moule qui doivent être réalisées avec soins et précisions. Le résumé des paramètres optimisés d'injection adoptés pour l'élaboration des éprouvettes est le suivant :

- Force de fermeture du moule : 250bars
- Profil de Température de la vis : 175/175/175/180/180/180/180/180.
- Temps de refroidissement : 40s
- Débit d'injection : 8cm³/s (injection en un palier)
- Temps du cycle : 47,93s

On obtient les éprouvettes saines ci-dessous (**Figure15**) qui seront utilisées pour la caractérisation mécanique du matériau.



Figure 15 : Epreuves de traction injectées

3-5. Résultats des propriétés mécaniques obtenus avec utilisation des paramètres optimisés de mise en œuvre du polystyrène recyclé et des biocomposites

3-5-1. Paramètres d'extrusion et d'injection optimisés utilisés

Tableau 12 : Paramètres d'élaboration du Polystyrène recyclé

Polystyrène recyclé	Extrusion (extrudeuse bi-vis Leistritz ZSE-27 (L/D - 40)).	Injection (presse ARBURG 370 S 700-70)
Profil de température (°C)	170 à 180	170 à 180
Température du moule (°C)	-	-
Vitesse de rotation (RPM) de la vis (tr/mn)	120	80
Débit matière à l'entrée de la vis (kg/h)	8	-
Force de fermeture du moule (bars)	-	250
Pression d'injection (bars)	-	60
Volume de matière injectée (cm ³ /s)	-	15
Vitesse de remplissage (cm/s)	-	25
Température de la buse (°C)	-	180
Durée de refroidissement (s)	-	45
Durée de maintien (s)	-	7
Durée total du cycle (s)	-	52,56

Tableau 13 : Paramètres d'élaboration des composites Polystyrène recyclé/coques de cotonnier

composites polystyrène recyclé/coques de cotonnier	Extrusion (extrudeuse bi-vis Leistritz ZSE-27 (L/D - 40))	Injection (presse ARBURG 370 S 700-70)
Profil de température ($^{\circ}C$)	160 à 175	160 à 180
Température du moule ($^{\circ}C$)	-	40
Vitesse de rotation (RPM) de la vis (tr/mn)	90	75
Débit matière à l'entrée de la vis (kg/h)	6	-
Force de fermeture du moule (bars)	-	250
Pression d'injection (bars)	-	60
Volume de matière injectée (cm ³ /s)	-	4
Vitesse de remplissage (cm/s)	-	25
Température de la buse ($^{\circ}C$)	-	180
Durée de refroidissement (s)		40
Durée de maintien (s)		7
Durée total du cycle (s)		47,93

3-5-2. Performances mécaniques

Les résultats des différents essais mécaniques sont résumés dans les **Tableaux 14 à 17** et portent sur les quatre échantillons élaborés avec respectivement des taux de coques de cotonnier de 10%, 15% et 20%. Des **Figures** sont également présentées dans cette partie pour illustrer l'évolution des propriétés mécaniques mesurées sur ces échantillons.

3-5-2-1. Flexion

Tableau 14 : Résultats des mesures de masse volumique et du module élastique de flexion

	Masse volumique (g/cm ³)				Flexion			
					Module E (MPa)			
	0%	10%	15%	20%	0%	10%	15%	20%
Valeurs moyennes	0,794±0,047	0,701±0,024	0,680±0,029	0,662±0,028	805±11,874	1770,572±0,406	1771,352±0,277	1771,482±0,029
Valeurs Spécifiques (E spécifique) : $E_s = E \cdot \rho^{-1}$					1013,853	2525,780	2603,818	2673,612

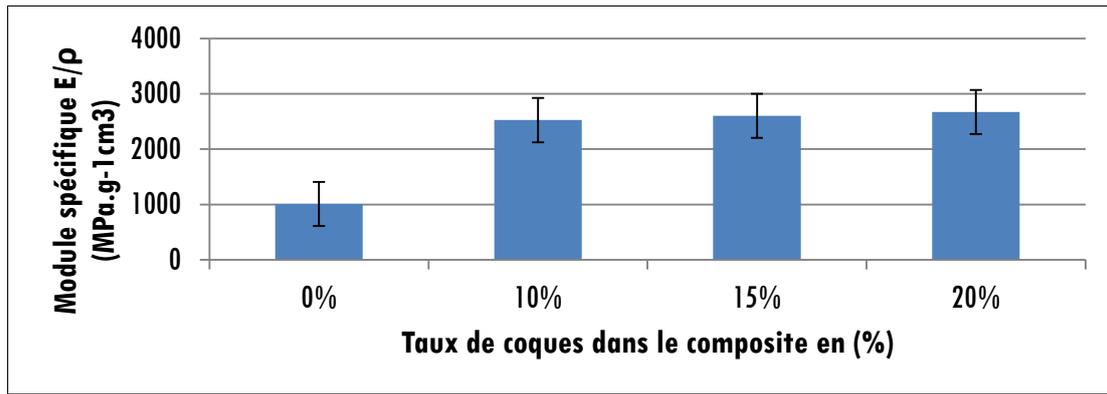


Figure 16 : Evolution du module spécifique en flexion en fonction du taux de fibres dans le composite

Les résultats des propriétés mécaniques en flexion, montrent une amélioration des propriétés mécaniques avec l'ajout des coques de cotonnier. Cette amélioration est plus marquée pour le composite contenant une teneur de 20% en coques de cotonnier (**Tableau 14 et Figure 16**). Ce résultat est analogue à ceux trouvés par Thwe et al.[15], Ausias et al. [18], Misnon et al.[20] et Le Duigou et al.[21], où l'ajout de fibres de bambou et de lin dans le Polypropylène a conduit à une augmentation du module d'Young et une diminution de la déformation à rupture. En ce qui concerne la masse volumique, on observe sa diminution pour des composites (Le Duigou et al.[21]) avec l'addition de fibres (**Tableau 14**). Ceci s'explique probablement par le fait de la faible masse volumique des fibres par rapport à celle du polystyrène recyclé.

3-5-2-2. Traction

Tableau 15 : Résultats de l'essai de traction

	TRACTION											
	Module Et (Mpa)				Contrainte maximale (Mpa)				Déformation à la rupture (%)			
	0%	10%	15%	20%	0%	10%	15%	20%	0%	10%	15%	20%
Valeurs moyennes	26,682±1,065	30,004±0,479	30,676±0,232	30,718±0,143	4,439±0,523	17,028±0,227	18,058±0,030	18,309±0,053	25,528±0,833	3,318±0,013	2,706±0,005	2,133±0,007
Valeurs spécifiques	33,604	42,801	45,092	46,361	5,590	24,291	26,544	27,632				

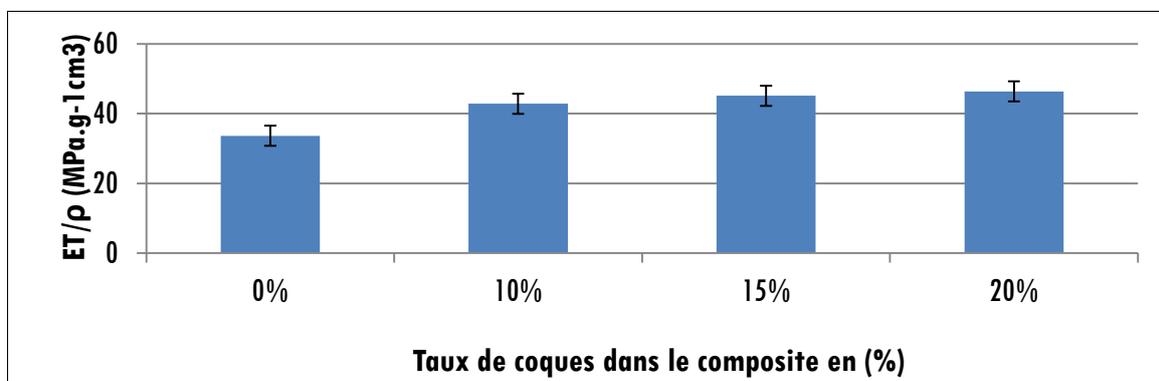


Figure 17 : Evolution du module spécifique de traction en fonction du taux de fibres dans le composite

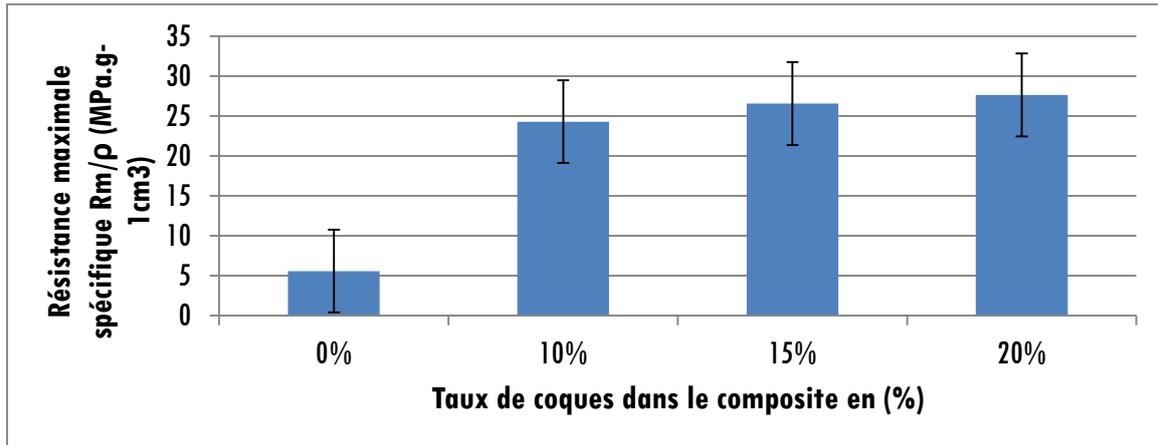


Figure 18 : Evolution de la résistance maximale spécifique de traction en fonction du taux de fibres dans le composite

Le **Tableau 15** et les **Figures (17 et 18)** montrent que l'ajout des coques de cotonnier entraîne une amélioration des propriétés mécaniques comme la résistance maximale à la rupture et le module de traction. Par contre, on observe une diminution de la déformation et donc de l'allongement pour cent. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Nayak et al. [16] (composites PP/fibres de bambou/fibres de verre), Mutje et al. [17] (fibres de chanvre/PP), G. Ausias et al. [18] (fibres de lin/PP) et Misnon et al. [20] (fibres de kénaf/PP), en essais de traction.

3-5-2-3. Torsion

Tableau 16 : Résultats de l'essai de torsion

Torsion				
Module de Coulomb G (MPa)				
	0%	10%	15%	20%
Valeurs moyennes	$0,317 \pm 0,065$	$0,319 \pm 0,079$	$0,321 \pm 0,232$	$0,341 \pm 0,143$
Valeurs spécifiques	0,399	0,445	0,446	0,514

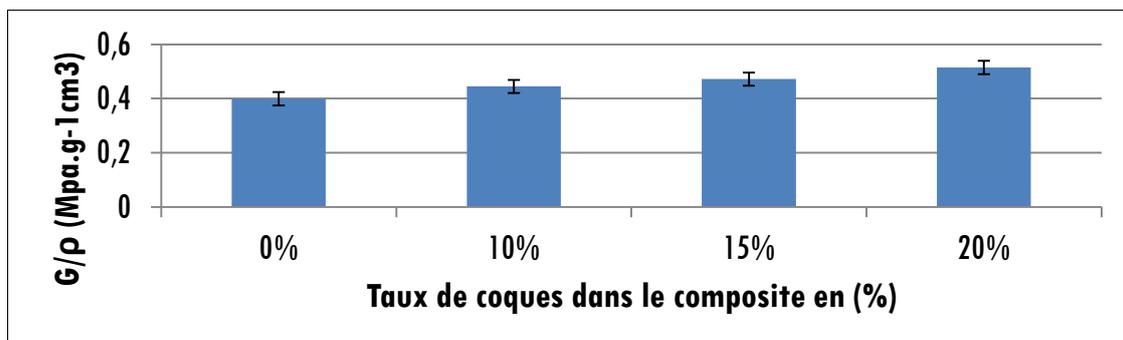


Figure 19 : Evolution du module spécifique de Coulomb en fonction du taux de fibres dans le composite

L'amélioration des propriétés mécaniques est peu significative, puisque pour une valeur de 20% en coques, le module de Coulomb augmente d'environ 0,27 MPa. On remarque que le module de cisaillement varie significativement avec l'augmentation de la concentration en fibres (coques de cotonnier) : il est de 0,319 MPa pour 10%, 0,321 MPa pour 15% et 0,341 MPa pour 20%. Similairement à la flexion, on constate une amélioration des propriétés mécaniques en torsion avec l'ajout des fibres dans le polystyrène.

3-5-2-4. Impact

Tableau 17 : Résultats de l'essai d'impact

	IMPACT							
	Module (MPa)				Résistance à l'impact (J/m ²)			
	0%	10%	15%	20%	0%	10%	15%	20%
Valeurs moyennes	18,309±0,053	17,858±0,030	17,028±0,227	16,5802±0,4227	23,520±0,303	19,109±0,856	17,249±0,857	15,228±1,190
Valeurs spécifiques					29,622	27,259	25,354	22,983

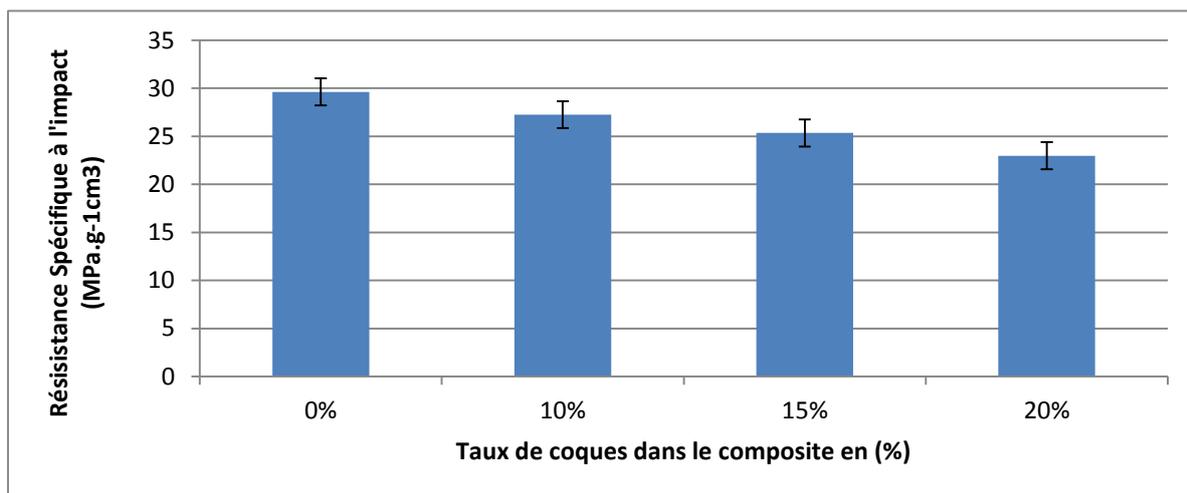


Figure 20 : Evolution de la résistance spécifique à l'impact en fonction du taux de fibres dans le composite

La **Figure 20** montre que la résistance à l'impact est similaire au comportement de l'allongement pour cent. En effet, le polymère seul possède une bonne capacité à absorber l'énergie sans se briser. Cependant, lorsqu'on introduit des coques de cotonnier (fibre) dans polymère, la fibre amène une certaine rigidité qui permet au matériau de résister ; mais en même temps, le matériau perd alors en résilience et gagne alors en rigidité. Ce résultat est en accord avec les résultats obtenus par Thwe et al., [15], Nayak et al. [16] (composites PP/fibres de bambou/fibres de verre), Mutje et al. [17] (composites PP/fibres de chanvre) et Faruk et al. [19] (composites fibres d'abaca/PP).

3-5-2-5. Influence de la masse volumique sur les propriétés mécaniques

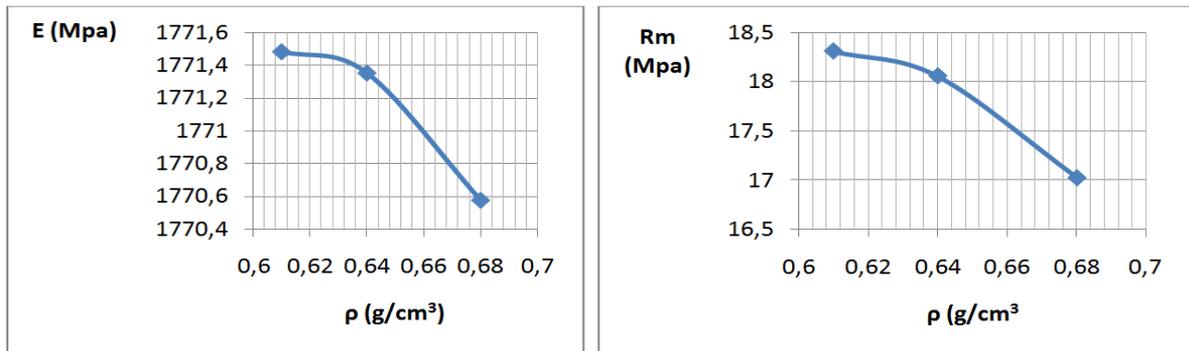


Figure 21 : Evolution du module de Young et de la résistance à la rupture en traction en fonction de la masse volumique

La **Figure 21** montre l'influence de la masse volumique du composite c'est-à-dire l'influence du taux de coques de cotonnier sur le module de Young et sur la contrainte à la rupture en traction du composite polystyrène/coques de cotonnier. La répartition des coques de cotonnier, a une influence non seulement sur le taux volumique de fibres, mais aussi une action directe sur les propriétés mécaniques du composite et sur son anisotropie. Ainsi on atteint de bonnes propriétés mécaniques avec de faibles densités du matériau car la résistance spécifique et le module spécifiques sont élevés. En outre, les paramètres spécifiques tels que le module spécifique et les contraintes spécifiques augmentent avec l'incorporation d'un taux croissant en coques de cotonnier. Les meilleurs résultats mécaniques ont été aussi observés pour les échantillons contenant un taux de 20% de coques de cotonnier. On peut donc conclure que le meilleur matériau élaboré dans le cadre de cette étude est le biocomposite (polystyrène recyclé/coques de cotonnier) avec un taux de 20% en coques de cotonnier. Enfin le **Tableau 18** ci-dessous compare les propriétés des différents composites réalisés avec celles d'autres matériaux en vue de leur utilisation en complément ou en remplacement de ces derniers dans diverses applications.

Tableau 18 : Tableau comparatifs des propriétés mécaniques du composite (PS recyclé + coques de cotonnier) avec d'autres matériaux en vue de diverses applications

Matériau	Masse volumique g/cm³ (ISO 1183)	E Flexion (MPa) (ISO 178)	Rm (MPa) (ISO 527-2)	Impact IZOD (KJ/m²) ISO 180	Allongement (%) (ISO 527-2)
PS standard (cristal)	1,05	2900	35 à 48	-	2 à 3
PS choc	1,04	1600 à 2500	16 à 36	4 à 6	20 à 60
Copolymère choc SB	1,01	1000 à 1200	18	20 à 26	≥ 200
PS recycle	0,77	800	4	23,52	25,52
PS recyclé + coques de coton (10% à 20%)	0,68	1770 à 1771,48	17,02 à 18	15,22 à 19,10	2,13 à 3,3
PS + Chanvre	-	3045 à 4226	38,9 à 40,4	12,7 à 17,6	1,92 à 2,26

4. Conclusion

L'objectif visé dans ce chapitre était l'élaboration d'un matériau à partir des coques de cotonnier associées à du polystyrène recyclé et l'optimisation des procédés de mise en œuvre du matériau. Tout d'abord, un compound constitué de coques de cotonnier comme renfort et de polystyrène recyclé comme matrice a été élaboré, en s'attachant à montrer l'influence des paramètres d'élaboration tels que la vitesse de la vis d'extrusion, le profil de température de la vis ainsi que la teneur en eau initiale du mélange au niveau de la conduite de l'extrudeuse ; Ensuite les échantillons ont été injectés sur une presse, et les paramètres étudiés, étaient le profil de température, la force de fermeture du moule et le guidage des deux parties du moule. L'influence de tous ces paramètres a été dégagée et les valeurs optimales ont été identifiées pour produire des éprouvettes et produits finis conformément aux propriétés mécaniques attendues au regard de leurs domaines d'application. Ainsi les paramètres retenus au niveau de l'extrudeuse pour la mise en œuvre du compound sont le profil de température (°C) : 160/170/170/170/175/175/175/175 , la vitesse de rotation (RPM) de la vis (tr/mn) : 90 , la Teneur en eau du mélange à l'entrée de la trémie (%) : 7. Au niveau de l'injection, les paramètres opératoires utilisés sur la presse à injection sont la force de fermeture du moule : 700 bars , le profil de température de la vis : 160/160/175/175/175/180/180/180 , le Temps de refroidissement : 40s , la Vitesse de rotation (RPM): 75 , la température de refroidissement du moule (°C) : 40. Ces paramètres optimisés nous ont permis de produire trois échantillons de biocomposites avec des taux encoques de cotonnier de 10%, 15% et 20% qui ont ensuite été caractérisés.

Les résultats des caractérisations mécaniques effectués indiquent clairement que le biocomposite à 20% de coques de cotonnier possède les propriétés mécaniques les plus élevées et constitue donc le meilleur matériau. De plus, une comparaison des propriétés des échantillons de biocomposites élaborés avec celles du PS choc et du PS standard (*Tableau 18*) permet d'envisager au vue des domaines d'applications actuelles de ces deux derniers matériaux, leur utilisation soit en remplacement ou/et en complément de ces deux matériaux dans les applications suivantes : emballages alimentaires et connexes pour produits laitiers tels que les pots de yaourts ; emballages variés tels que les boîte à œufs, vaisselle à usage unique (gobelets, assiettes jetables, couverts...). Dans l'électroménager : fabrication des parties extérieures de lave-linge, divers appareils ménagers. En Electronique grand public : coffret et façade de téléviseurs, photocopieurs, imprimantes, ordinateurs, coques d'iphone,...

Références

- [1] - J. L. THOMASON, «The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene. The properties of injection moulded long fibre PP at high fibre content», Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 36, N° 7 (juill. 2005) 995-1003.
- [2] - H. G. B. PREMALAL, H. ISMAIL, et A. BAHARIN, « Comparison of the mechanical properties of rice husk powder filled polypropylene composites with talc filled polypropylene composites », Polymer Testing, Vol. 21, N° 7 (2002) 833-839.
- [3] - H. D. ROZMAN, B. K. KON, A. ABUSAMAH, R. N. KUMAR, et Z. A. M. ISHAK, « Rubberwood-highdensity polyethylene composites: Effect of filler size and coupling agents on mechanical properties », Journal of Applied Polymer Science, Vol. 69, N° 10, (1998) 1993-2004.
- [4] - J. E. STAMHUIS, « Mechanical properties and morphology of polypropylene composites. III. Short glass fiber reinforced elastomer modified polypropylene », Polymer Composites, Vol. 9, N° 4, (1988) 280-284.

- [5] - A. LE DUIGOU, I. PILLIN, A. BOURMAUD, P. DAVIES, et C. BALEY, « Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(l-lactide) composites », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, N° 9(sept.2008) 1471-1478.
- [6] - C. BALEY, Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.33,(2002) 939-948.
- [7] - <http://www.developpement-durable.psa.fr>.
- [8] - S. M. LUZ, A. CALDEIRA-PIRES, et P. M. C. FERRÃO, « Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components », *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54, N°12 (oct.2010) 1135-1144.
- [9] - S.V.JOSHI, L.T. DRZAL, A.K., MOHANTY, S. ARORA, «Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites»? *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.* 35, (2003) 371-376.
- [10] - K. OKSMAN, A. P. MATHEW, R. LÅNGSTRÖM, B. NYSTRÖM, et K. JOSEPH, « The influence of fibre microstructure on fibre breakage and mechanical properties of natural fibre reinforced polypropylene », *Composites Science and Technology*, Vol. 69, N°11-12, (sept. 2009) 1847-1853.
- [11] - D. N. SAHEB et J. P. JOG, « Natural fiber polymer composites: A review », *Advances in Polymer Technology*, Vol. 18, N°4(1999) 351-363.
- [12] - G. AUSIAS, A. BOURMAUD, J. M. VEILLE, C. BALEY Effect of fibre characteristics and process conditions on the mechanical properties of vegetal fibre reinforced polypropylene *Applied Composite Materials*. AMAC. 17emes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), (Juin 2011) Poitiers-Futuroscope, France. pp.180.
- [13] - ALAIN BOURMAUD, CHRISTOPHE BALEY, Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 94, Issue 3 (March 2009) 297-305.
- [14] - A. ARBELAIZ, B. FERNANDEZ, J. A. RAMOS, A. RETEGI, R. LLANO-PONTE, I. MONDRAGON, Mechanical properties of short flax fibre bundle/polypropylene composites: Influence of matrix/fibre modification, fibre content, water uptake and recycling, *Composites Science and Technology*, Volume 65, Issue 10(August 2005) 1582-1592.
- [15] - M. M. THWE, K.LIAO, Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites; *Composites, Part A* 33,(2002) 43-52
- [16] - S.K.NAYAK, S.MOHANTY, S.K.SAMAL, Influence of short bamboo/glass fiber on the thermal, dynamic mechanical and rheological properties of polypropylene hybrid composites, *Materials Science and Engineering, A* 523, (2009) 32-38.
- [17] - P. MUTJÉ, M. E. VALLEJOS, J. GIRONES, F. VILASECA, A. LOPEZ, J.P. LOPEZ, J. A. MENDEZ, Effect of maleated polypropylene as coupling agent for polypropylene composites reinforced with hemp strands. *J. Appl. Polym. Sci.*, 102, (2006) 833-840.
- [18] - G. AUSIAS, A. BOURMAUD, G. COROLLER, C. BALEY, Study of the fibre morphology stability in polypropylene-flax composites. *Polymer Degradation and Stability* 98 (2013) 1216-1224.
- [19] - O. FARUK, A. K. BLEDZKI, H. P. FINK, M. SAIN, Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000—2010 *Progress in Polymer Science* 37 (2012) 1552— 1596.
- [20] - M. I. MISNON, M. M. ISLAM, J. A. EPAARACHCHI K.-T. LAU, (2014) Potentiality of utilising natural textile materials for engineering composites applications. *Materials and Design*, 59 (2014). pp. 359-368. ISSN 0261-3069.
- [21] - A. LE DUIGOU, C. BALEY, Coupled micromechanical analysis and life cycle assessment as an integrated tool for natural fiber composites development. *Journal of cleaner production*, 83, (2014) 61-69.