



**HAL**  
open science

## Comportement dynamique sous différentes températures des polypropylènes recyclés

Hamdi Jmal, Wiyao Azoti, Christiane Wagner-Kocher, Raphaël Dupuis, Nadia Bahlouli

### ► To cite this version:

Hamdi Jmal, Wiyao Azoti, Christiane Wagner-Kocher, Raphaël Dupuis, Nadia Bahlouli. Comportement dynamique sous différentes températures des polypropylènes recyclés. Journées Nationales sur les Composites, Association pour les MATériaux Composites (AMAC), Jul 2019, Bordeaux, France. <hal-02172164>

**HAL Id: hal-02172164**

**<https://hal.science/hal-02172164v1>**

Submitted on 3 Jul 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## Comportement dynamique sous différentes températures des polypropylènes recyclés

### *Dynamic compression behavior of recycled polypropylene under different temperature*

Jmal Hamdi<sup>1</sup>, Azoti Wiyao<sup>1,2</sup>, Wagner-Kocher Christiane<sup>3,4</sup>, Dupuis Raphaël<sup>5</sup> et Bahlouli Nadia<sup>1</sup>

1 : ICube, Université de Strasbourg, CNRS,  
2-4 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France  
e-mail : jmal@unistra.fr et nadia.bahlouli@unistra.fr

2 : ECAM Strasbourg-Europe, Département énergie  
2 rue de Madrid, 67300 Schiltigheim, France  
e-mail : wiyao.azoti@ecam-strasbourg.fr

3 : LMGC  
CNRS, Université Montpellier, France  
e-mail : christiane.wagner-kocher@umontpellier.fr

4 : LPMT  
Université de Haute Alsace  
11 rue Alfred Werner, 68093 Mulhouse, France

5 : IRIMAS  
Université de Haute Alsace  
12 rue des frères Lumières, 68093 Mulhouse, France  
e-mail : raphael.dupuis@uha.fr

### Résumé

Pour répondre à des cahiers des charges très variables en termes de conditions d'usage telles que la température et la vitesse, les recycleurs de polypropylène PP sont amenés à ajouter des adjuvants et/ou des charges. Toutefois, l'ajout de certains éléments peut modifier considérablement les propriétés mécaniques ainsi que les mécanismes de déformation. De plus, les propriétés du matériau recyclé dépendent forcément de l'origine des dépôts des déchets. L'objectif de cette étude est de comprendre l'influence des adjuvants et des charges et/ou contaminants sur le comportement dynamique sous différentes températures des polypropylènes recyclés. Nous avons considéré un premier lot de PP régénérés comportant trois références qui correspondent à trois indices de fluidité (grades) différents. Afin de déterminer la variabilité des propriétés mécaniques sur une durée d'une année, différents lots de PP régénérés de grade 10 issus du même procédé de recyclage ont été prélevés tous les trois mois et étudiés. Les constituants chimiques des polypropylènes recyclés ont été déterminés par analyses physico-chimiques lors d'une précédente étude [1]. Des essais de compression dynamique sur des barres d'Hopkinson sont ensuite réalisés à différentes températures, en dessous et au-dessus de la température de transition vitreuse, permettant ainsi d'identifier la sensibilité du comportement à la température lors de sollicitations sévères de type choc. Les résultats obtenus sont finalement comparés à ceux d'un PP non régénéré pour expliquer l'effet combiné des additifs et du recyclage.

### Abstract

In order to satisfy the different customer requirements such as use temperature and speed, recyclers introduce additives and/or fillers to the regenerated polypropylene. However, this addition can change significantly the mechanical properties as well as the deformation mechanisms. Moreover, the properties of the regenerated material depend necessarily on the waste deposit origins and on the chemical constituents.

The objective of this paper is to understand the influence of adjuvants, fillers and/or contaminants on the dynamic behavior of the regenerated polypropylene under different temperatures. We considered a first sample of regenerated PP which contains three references with three different fluidity indices (grades). To determine the variability of the mechanical properties over a one-year period, different samples of regenerated PP grade 10 from the same recycling process were collected every three months and studied. The chemical constituents of the recycled polypropylene were determined by physico-chemical analysis in a previous study [1]. Dynamic compression tests on Hopkinson bars are then performed at different temperatures, below and above the glass transition temperature. This experimentation allows

identifying the sensitivity of the dynamic behavior to the temperature. The results obtained are finally compared with those of a non-regenerated (Virgin) PP in order to explain the combined effect of additives and recycling.

**Mots Clés** : régénération, polypropylène, grade, comportement dynamique, effet de température, propriétés mécaniques.

**Keywords**: regenerated polypropylene, grade, dynamic behavior, temperature effects, mechanical properties.

## 1. Introduction

Le polypropylène ‘PP’ et les composites à matrice polypropylène [2] sont caractérisés par un spectre intéressant des propriétés mécaniques tels que : une faible densité et un faible prix, une bonne rigidité, une limite d'élasticité acceptable et une grande résistance au vieillissement. La forte utilisation des PP et de ses composés a induit une augmentation considérable des déchets plastiques. Pour des raisons économiques et surtout environnementales, les efforts de recyclages ont connu un développement important et les polypropylènes recyclés sont actuellement utilisés dans de nombreux domaines comme par exemple l'industrie automobile, le génie civil ou la décoration. Les effets du recyclage sur le PP « pur » ont fait l'objet de nombreuses études [3–10]. Certaines dégradations induites par le vieillissement et le recyclage des composites à base de polypropylène ont été quantifiées sous chargement quasi statique par Luda et al [5, 6]. D'autres auteurs comme Aurrekoetxea et al. [3], Guerrica-Echevarria et al. [4] ont montré que les propriétés physiques du PP pur ainsi que ses caractéristiques rhéologiques sont dégradées après un ou plusieurs recyclages. L'indice de fluidité à chaud (MFI) ainsi que le degré de cristallinité ( $\chi_c$ ) augmente avec le recyclage. Parallèlement, la masse molaire et la température de fusion ( $T_m$ ) diminuent de manière continue avec le nombre d'extrusions successives. En effet, au cours des multiples extrusions et/ou procédés de broyage, les chaînes de polymère subissent de nombreuses scissions qui sont la cause des dégradations des propriétés mécaniques [7, 8, 10, 11].

Pour pallier aux effets de recyclage et afin de répondre à des cahiers de charges très variables en termes de conditions d'usage telles que la température et la vitesse, les recycleurs sont amenés à ajouter des adjuvants et/ou des charges. Toutefois, l'adjonction de certains éléments modifie considérablement les propriétés mécaniques ainsi que les mécanismes de déformation. De plus, les propriétés du matériau régénéré dépendent forcément de l'origine des dépôts de déchets et de ses constituants chimiques. L'ajout de charges telles que le Carbonate de Calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) et le talc sont le plus souvent utilisés pour augmenter la rigidité et la stabilité dimensionnelle des polymères mais également comme charge de remplissage pour limiter le coût de la matière première [12]. Bien qu'un effort de tri soit opéré chez les recycleurs, en raison de la complexité des matériaux entrants (flaconnages, pare-choc, etc.), le polymère recyclé se présente souvent comme un mélange de plusieurs polymères comme le polypropylène (PP), le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polyéthylène (PE). L'incompatibilité entre PE et PP a déjà été signalée dans divers travaux [13, 14]. L'immiscibilité entre les phases PP et PE induit la diminution des propriétés mécaniques comme la résistance aux chocs, la déformation à la rupture et la température de transition ductile-fragile.

Les recycleurs classent les PP recyclés selon l'indice de fluidité appelé aussi grade. Dans une étude antérieure, nous avons montré que, contrairement au PP pur, les propriétés mécaniques en traction quasi-statique des PP recyclés à partir de différents types de gisement de déchets ne sont pas reliées aux grades dû à l'impact non négligeable des adjuvants et contaminants [1]. Le comportement des polymères dépend fortement de la température. Ils sont le siège de transitions de comportement qui peuvent être associées aux différentes relaxations moléculaires, i.e. activation de changements de conformations locales. D'un point de vue macroscopique cela se traduit par des évolutions de comportement plus brutales pour certaines gammes de température.

L'objectif principal de ce papier est de comprendre l'influence des adjuvants, des charges et/ou contaminants sur les propriétés mécaniques en compression dynamique des polypropylènes

régénérés. Pour cela, nous avons considéré un premier lot de PP régénérés comportant 3 références qui correspondent à trois indices de fluidité (grades) différents. Des essais de compression dynamique sur les barres d’Hopkinson ont ensuite été réalisés à différentes vitesses de déformations et à différentes températures, en dessous et au-dessus de la température de transition vitreuse ( $T_g$ ). Cette étude expérimentale nous a permis d’identifier la sensibilité du comportement dynamique à la température et d’étudier l’évolution de la transition ductile/fragile. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux d’un PP non régénéré (vierge) pour expliquer l’effet combiné des additifs et du recyclage. Enfin, afin de déterminer la variabilité des propriétés mécaniques sur une durée d’une année, différents lots de PP régénérés grade10 issus du même procédé de recyclage ont été prélevés tous les trois mois et étudiés.

## 2. Matériaux et méthodes

### 2.1 Matériaux

Un premier lot de PP régénérés comportant 3 références qui correspondent à trois indices de fluidité différents a été fournis par le recycleurs « Paprec plastique ». Afin de déterminer la variabilité des propriétés mécaniques sur une durée d’une année, trois autres lots de PP régénérés grade10 issus du même procédé de recyclage ont été prélevés tous les trois mois et étudiés. Des analyses physico-chimique élémentaires, thermogravimétrique (ATG), de calorimétrie différentielle à balayage (DSC), de spectroscopie infrarouge (FTIR) ont permis l’identification des constituants chimiques des différents lots et grade des PP régénérés. Dans le but d’une étude comparative, nous avons considéré un PP non régénéré (vierge). Il s’agit d’un homopolymère isotactique, de référence « Moplen HP500 » produit par « LyondellBasell » (Francfort-sur-le-main, Allemagne). Les propriétés physico-chimiques des PP testés identifiés dans une précédente étude [1] sont résumées dans le tableau 1.

Désignation	PP3 (1)	PP10 (1)	PP54 (1)	PP10 (2)	PP10 (3)	PP10 (4)	PPV	
T° injection	220	220	220	230	230	230	220	
MFI (g/10min)	3	10.3	54.1	10.1	11	11	12	
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0.968	0.951	0.923	0.928	0.926	0.926	0.900	
Couleur	Gris	Noir	Blanc	Noir	Noir	Noir	Transparent	
Analyses Physico-chimiques	Polymères	PP /PE***	PP / PE**	PP /PE*	PP /PE**	PP / PE**	PP	
	$M_w$ (g/mol)	273000	215800	156000	----	----	----	
	Taux cristallinité $\chi_c$ (%)	38	41	41	----	----	----	
	charges (%)	8.3	4.1	2.5	4.3	4.4	4.3	$\approx 0$
	Types d’additifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CaCO<sub>3</sub> 5%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brome *</li> <li>• CaCO<sub>3</sub> 1.8%</li> <li>• Noir de carbone 3%</li> <li>• Peroxyde modifié**</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peroxyde modifiée**</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baryum*</li> <li>• CaCO<sub>3</sub> 2.7%</li> <li>• Noir de carbone 3%</li> <li>• Peroxyde modifiée*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baryum</li> <li>• CaCO<sub>3</sub></li> <li>• Noir de carbone*</li> <li>• Peroxyde modifié</li> </ul>		
*Faible quantité, ** Moyenne quantité, ***Grande quantité								
Ajout de Peroxyde principalement pour augmenter le MFI $\chi_c$ (%) est déterminé en supposant la présence que du PP dans les matériaux.					(1) : Lot 1 gisement à t <sub>1</sub> (2) : Lot 2 gisement à t <sub>1</sub> +3 mois (3) : Lot 3 gisement à t <sub>1</sub> +6 mois (4) : Lot 4 gisement à t <sub>1</sub> +9 mois V: PP vierge			

Tab. 1. Propriétés physico-chimiques des polypropylènes testés.

## 2.2 Méthode expérimentale

Des essais en compression dynamiques ont été réalisés sur un dispositif de barres d'Hopkinson développé spécialement pour les polymères au laboratoire ICube de Strasbourg. Les échantillons testés sont des disques de diamètre 8 mm et d'épaisseur 4 mm. Ils sont découpés sous presse à partir de plaques injectées. La mise au point de ces essais est décrite dans [7, 16]. Avant chaque essai, une très fine couche de vaseline a été déposée sur chaque éprouvette afin de minimiser les effets du frottement. Le système de barres d'Hopkinson est composé de deux barres en inox, une barre incidente et une barre réfléchiée parfaitement alignées, chacune de 3 m de long et de 22 mm de diamètre. L'échantillon est positionné entre les deux barres incidente et réfléchiée. Un projectile de 22 mm de diamètre et de 1m de longueur a été utilisé pour générer les ondes incidentes. Les ondes incidentes, transmises et réfléchiées sont mesurées à l'aide de jauges de déformations collées sur les deux barres. Ces signaux sont ensuite traités afin de calculer la contrainte et la déformation vraie dans l'échantillon déformé de façon homogène.

Les essais de compression dynamique sont réalisés à trois températures différentes, en dessous et au-dessus de la transition vitreuse supposée entre 5°C et 10°C, et deux vitesses de déformation afin d'étudier l'influence de la température et valider les résultats sur deux vitesses de sollicitations. La température 0°C est choisie d'une part parce qu'elle est au voisinage de la température de transition et d'autre part pour suivre les recommandations des essais dynamiques sur pièces automobiles. Les conditions expérimentales sont résumées dans le tableau 2.

Désignation des essais	C1T1	C1T2	C1T3	C2T1	C2T2	C2T3
Température en °C	-25	0	25	-25	0	25
Vitesse (s <sup>-1</sup> )	1000			1600		

Tab. 2. Conditions des essais de compression dynamique.

## 3. Résultats expérimentaux

Les courbes contraintes vraies – déformations vraies expérimentales (Fig. 1) montrent un comportement élasto-plastique endommageable. A faible température -25°C, tous les PP testés sont fragmentés alors qu'à la température 25°C et à la vitesse de 1000 s<sup>-1</sup>, les PP sont déformés sans rupture (Fig. 2). Les modules d'élasticité, la contrainte d'élasticité et la contrainte maximale sont étudiées et comparées afin de déterminer l'influence des grades, des additifs et des contaminants ainsi que l'influence de la température.

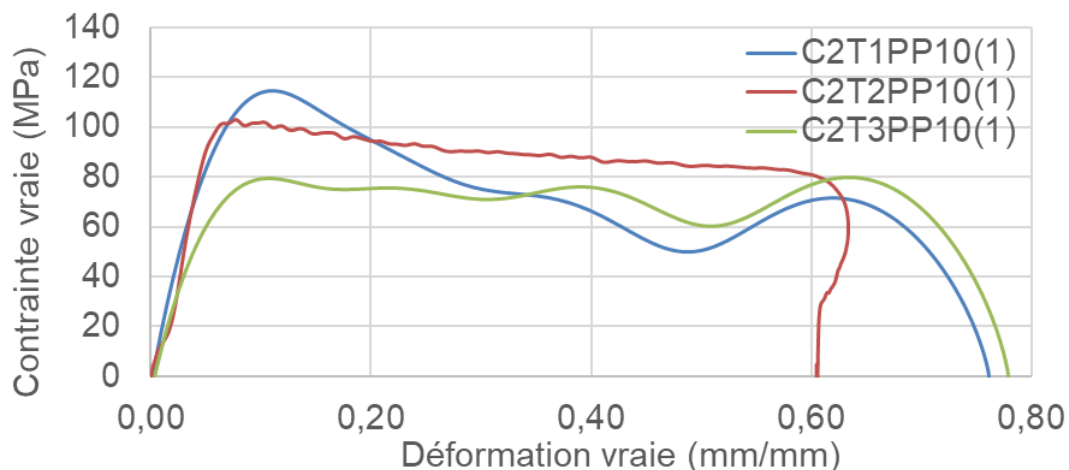


Fig. 1. Courbes contraintes-déformations, PP10(1), vitesse C2=1600 s<sup>-1</sup>, T1=-25°C, T2=0°C, T3=25°C.

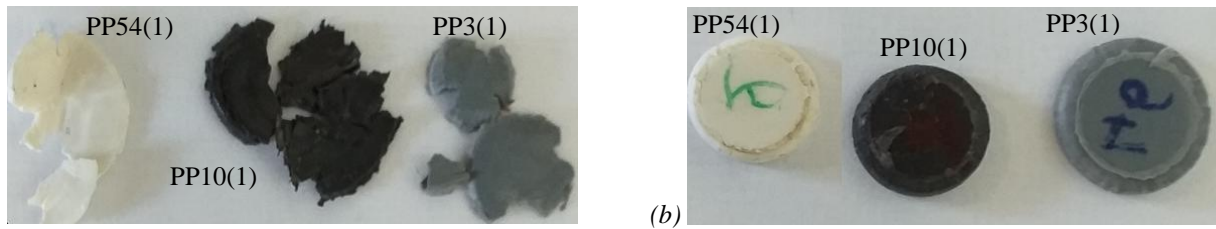


Fig. 2. Éprouvettes de PP recyclés testées : (a) vitesse  $C2=1600\text{ s}^{-1}$  et  $T1=-25^\circ\text{C}$ , (b) vitesse  $C1=1000\text{ s}^{-1}$  et  $T3=25^\circ\text{C}$

### 3.1 Influence des grades, des additifs et des contaminants

Les polypropylènes sont généralement classés selon leur indice de fluidité. Il s'agit d'une mesure de la facilité d'écoulement des plastiques fondus et il représente une estimation de l'extrudabilité. Pour contrôler le grade du PP, les fournisseurs ajoutent généralement du peroxyde qui agit comme un découpeur de chaînes. Théoriquement [17, 18], l'indice de fluidité de PP vierge (grade) est inversement proportionnel à la masse molaire. L'augmentation de la masse molaire est accompagnée par une augmentation des longueurs des chaînes polymères et du nombre d'enchevêtrement qui sont à l'origine d'une diminution de la mobilité moléculaire. La formation des structures cristallites devient donc plus difficile et les zones amorphes dans le PP vierge croissent en faveur des zones cristallines. Par conséquent, l'augmentation d'indice de fluidité d'un PP semi cristallin, vierge et pur implique une augmentation du module d'élasticité et de densité [17, 18].

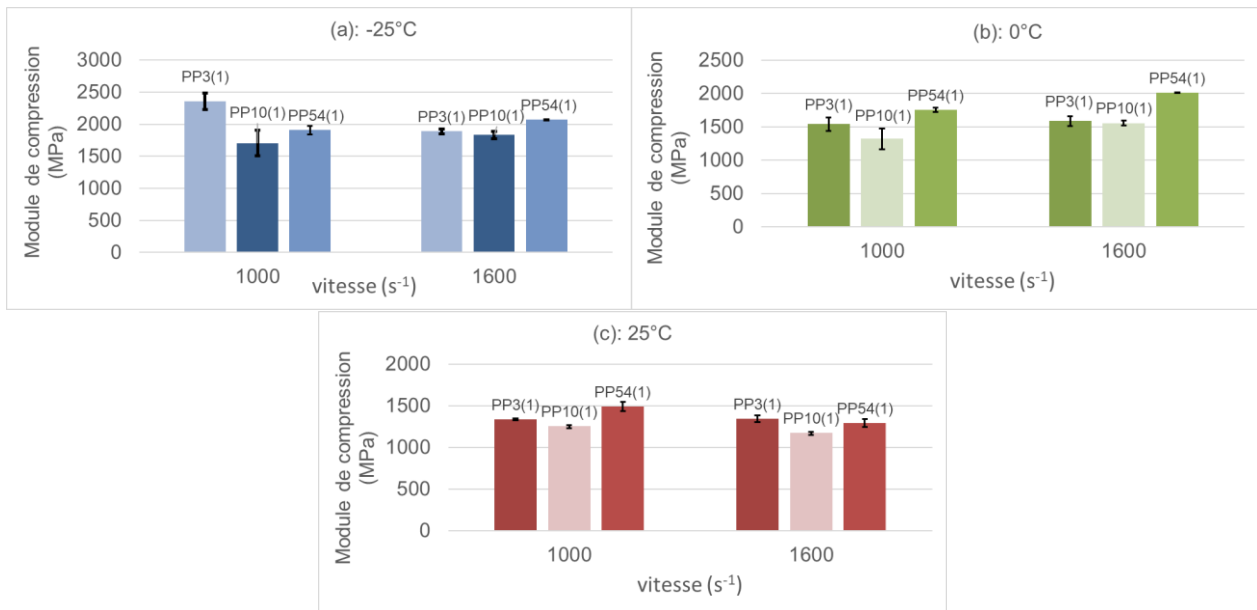


Fig. 3. Impact des grades, des additifs et/ou des contaminants sur le module de compression dynamique, (a)  $T1=-25^\circ\text{C}$ , (b)  $T2=0^\circ\text{C}$ , (c)  $T3=25^\circ\text{C}$ .

En se basant sur cette analyse bibliographique, il est attendu un module de compression dynamique pour le PP54(1) supérieur à celui du PP10(1) et un module pour le PP3(1) inférieur à celui du PP10(1). Cependant, les résultats expérimentaux (Fig. 3) montrent que le module du PP10(1) est le plus faible quelles que soient la vitesse et la température. Pour expliquer cette différence, nous nous sommes intéressés aux additifs et aux contaminants. Dans la littérature, il a été montré que l'ajout d'un taux de PE jusqu'à 50% induit une réduction importante du module d'élasticité et de la contrainte à la limite élastique [14]. La présence de PE en très faible quantité dans le PP54(1) justifie d'avantage le module d'élasticité et la limite élastique les plus importants. En comparant les quantités de PE présentes dans les grades 3 et 10, nous nous attendions à avoir un module

d'élasticité et une contrainte à la limite élastique du PP3(1) plus faibles. Il devrait y avoir une autre explication pour expliquer le fait que le module d'élasticité (Fig. 3) et la limite élastique (Fig. 4) du PP3(1) soient supérieurs à ceux du PP10(1). Le carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  et les particules de noir de carbone sont généralement ajoutés pour augmenter la rigidité et la résistance mécanique du polypropylènes [4]. Ils induisent une augmentation de la contrainte à la limite élastique. La présence de 5% de  $\text{CaCO}_3$  dans le PP3(1) contre 1.8% dans le PP10(1) peut expliquer le module d'élasticité et la limite élastique plus faibles dans le cas de PP10(1). La présence des traces de particules de noir de carbone et de brome dans le PP10(1) avec des faibles teneurs n'explique pas l'évolution des résultats.

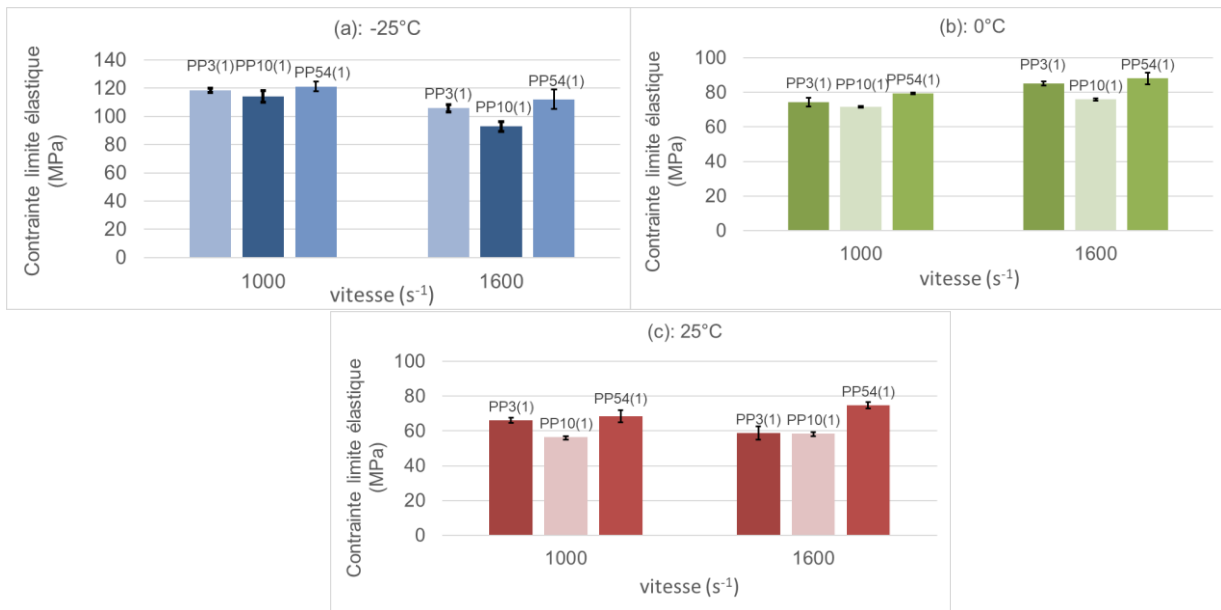


Fig. 4. Impact des grades, des additifs et/ou des contaminants sur la limite élastique en compression dynamique, (a) T1=-25°C, (b) T2=0°C, (c) T3=25°C.

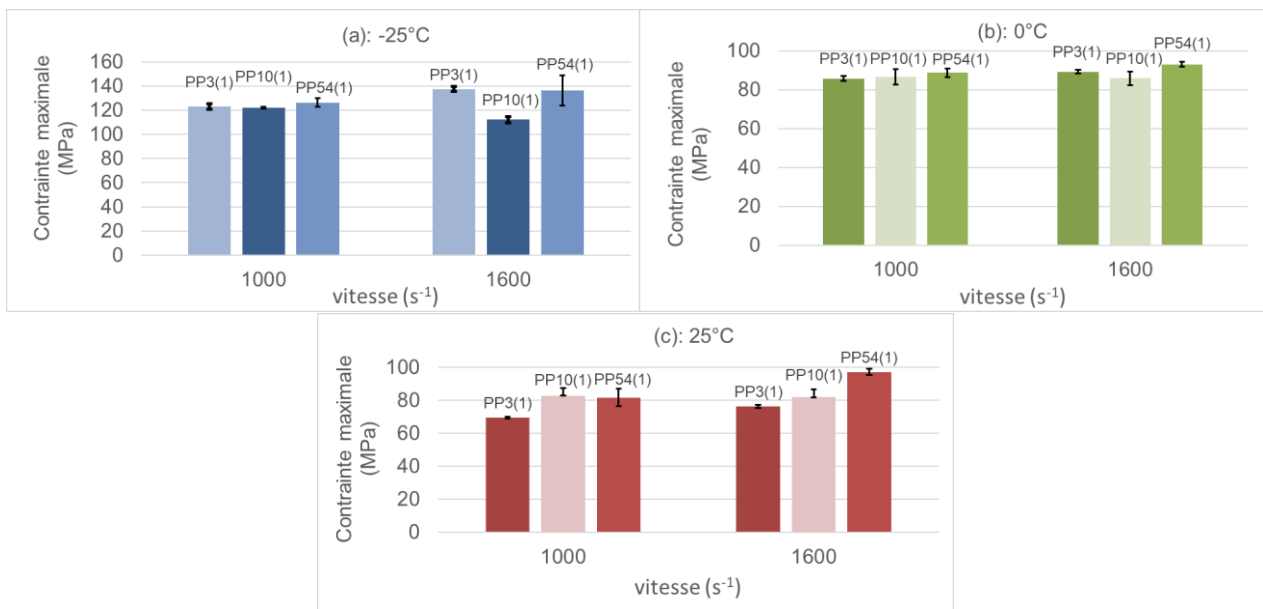


Fig. 5. Impact des grades, des additifs et/ou des contaminants sur la contrainte maximale en compression dynamique, (a) T1=-25°C, (b) T2=0°C, (c) T3=25°C.

La figure 5 illustre l'impact du grade, des additifs et/ou des contaminants sur la contrainte maximale en compression dynamique. A la température  $-25^{\circ}\text{C}$ , la contrainte maximale du PP10(1) est plus faible comparée à celles du PP54(1) et PP3(1) (Fig. 5-a). A  $0^{\circ}\text{C}$ , les contraintes maximales des trois grades sont quasi-similaires (Fig. 5-b), alors qu'à la température ambiante  $25^{\circ}\text{C}$ , il semble que la contrainte maximale en compression dynamique augmente avec le grade (Fig. 5-c). Dans des travaux antérieurs [1], nous avons constaté, à température ambiante, une augmentation de la résistance en traction quasi-statique avec le grade. Nous constatons ainsi que l'évolution de la contrainte maximale en fonction du grade, des additifs et des contaminants est sensible à la température.

### 3.2 Influence de la température

L'étude de la sensibilité à la température des matériaux PP issus des broyats de recycleurs montre des propriétés mécaniques dépendantes à la température. Pour une vitesse de déformation donnée, le module de compression (Fig. 6), la contrainte limite élastique (Fig. 7) et la contrainte maximale (Fig. 8) diminuent avec la température. Le mouvement des chaînes polymères, y compris la longueur de la liaison et l'angle de liaison nécessite des forces plus faibles quand la température augmente [18].

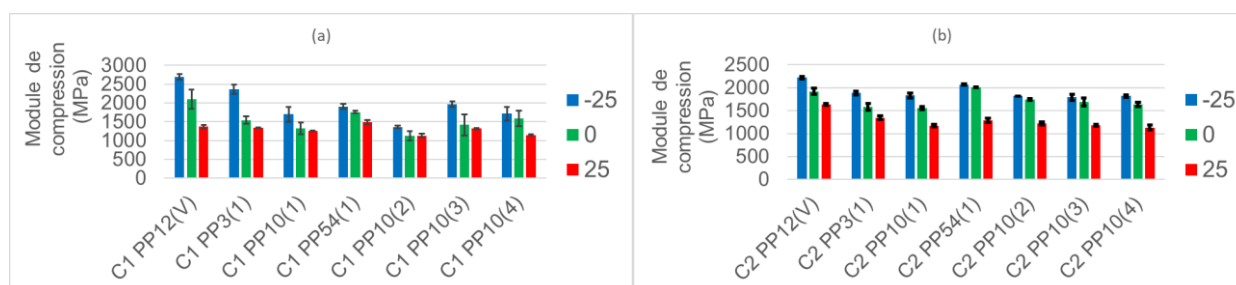


Fig. 6. Influence de la température sur le module de compression dynamique, (a)  $C1 = 1000 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $C2 = 1600 \text{ s}^{-1}$ .

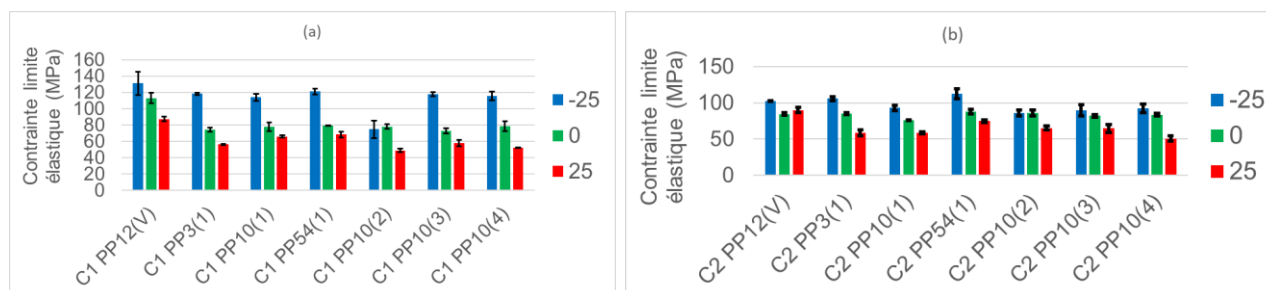


Fig. 7. Influence de la température sur la limite élastique, (a)  $C1 = 1000 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $C2 = 1600 \text{ s}^{-1}$ .

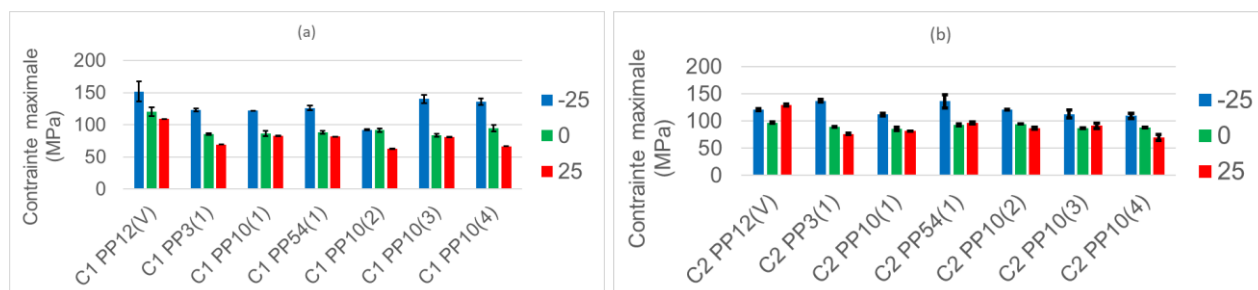


Fig. 8. Influence de la température sur la contrainte maximale, (a)  $C1 = 1000 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $C2 = 1600 \text{ s}^{-1}$ .

### 3.3 Analyse des faciès de rupture

Les observations MEB montrent des structures en forme de couche « d'oignon » due à la présence du PE dans les PP recyclés de grades 3 et 10, (Fig. 9-a et 9-b). Lors des essais de compression

dynamique, un délaminage et un glissement de couches ont été observés pour ces deux références. Quant au PP54, la matière est plus homogène avec la présence de microporosités observées à fort grossissement (Fig. 9-c). La rupture pour le PP54(1) n'est pas due à un délaminage. On pense qu'il s'agit de la propagation de fissurations développés au voisinage des microporosités.

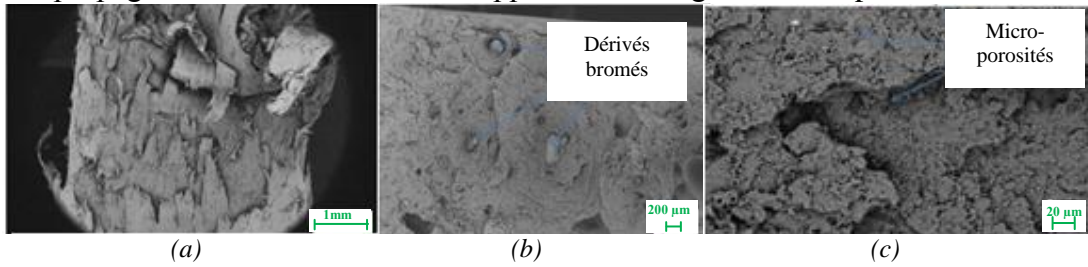


Fig. 9. Observation microscopiques des faciès des PP recyclés : (a) PP3(1), (b) PP10(1), PP54(1).

### 3.4 Analyse de la reproductibilité des propriétés des PP recyclés

La répétabilité des essais est illustrée sur les graphes par les barres d'erreurs qui quantifient la dispersion des propriétés pour un lot de PP recyclé à une condition d'essai donnée. Cette dispersion est faible et ne dépasse pas 9% de la valeur moyenne malgré l'origine déchet de la matière.

D'un point de vue industriel, il est nécessaire d'assurer un approvisionnement de PP recyclé avec des propriétés constantes à long terme. Pour cela, nous avons suivi la référence PP10 recyclé pendant toute une année avec un prélèvement trimestriel. La dispersion, entre les lots de PP recyclés grade 10, du module de compression (Fig. 10), de la contrainte limite élastique (Fig. 11) et de la contrainte maximale (Fig. 12) varie de 2% à 34%. Etant donné l'origine déchet et la variabilité de l'essai avec les barres d'Hopkinson, nous pouvons considérer qu'il s'agit d'une bonne reproductibilité entre lots. De plus, les petites dimensions des éprouvettes de compression dynamique comparées aux éprouvettes de traction quasi-statique, les rendent plus sensibles à la microstructure. Enfin, l'étude comparative des PP recyclés issu des broyats de recycleurs montrent des propriétés mécaniques en compression dynamique comparables aux échantillons vierges.

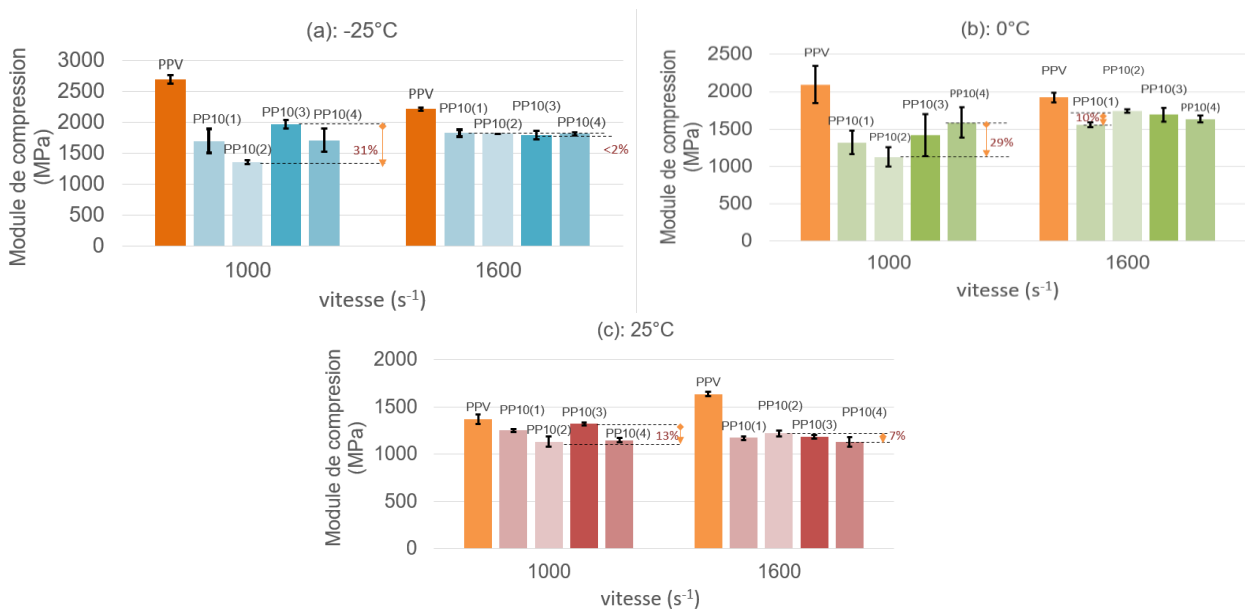


Fig. 10. Comparaison entre les lots différents lot de PP10 recyclés, module de compression : (a) -25°C, (b) 0°C, (c) 25°C.

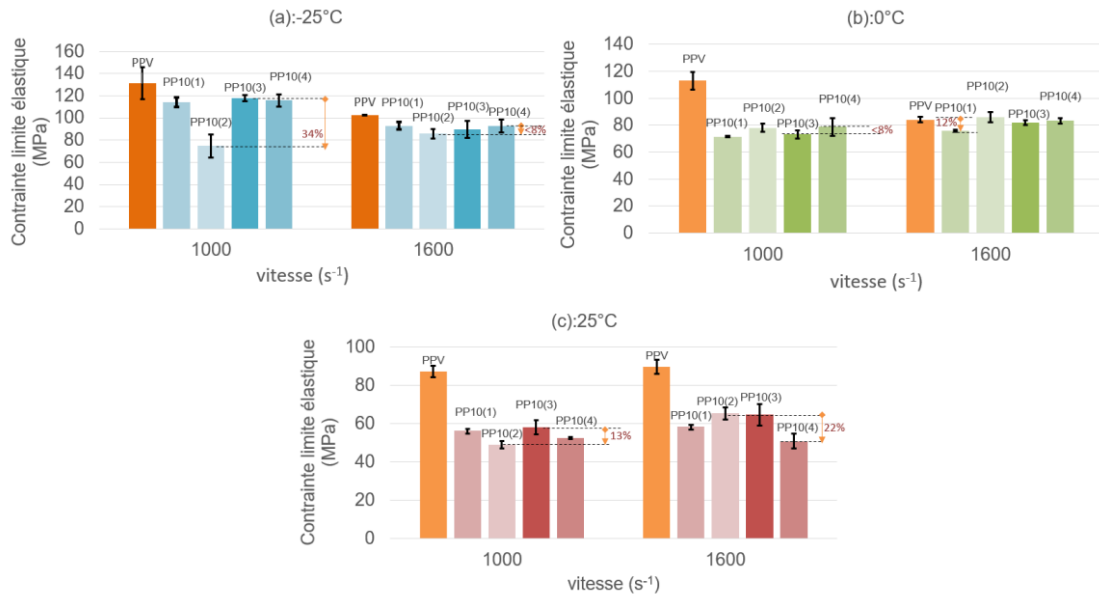


Fig. 11. Comparaison entre les lots différents lot de PP10 recyclés, Contraite à la limite élastique : (a) -25°C, (b) 0°C, (c) 25°C.

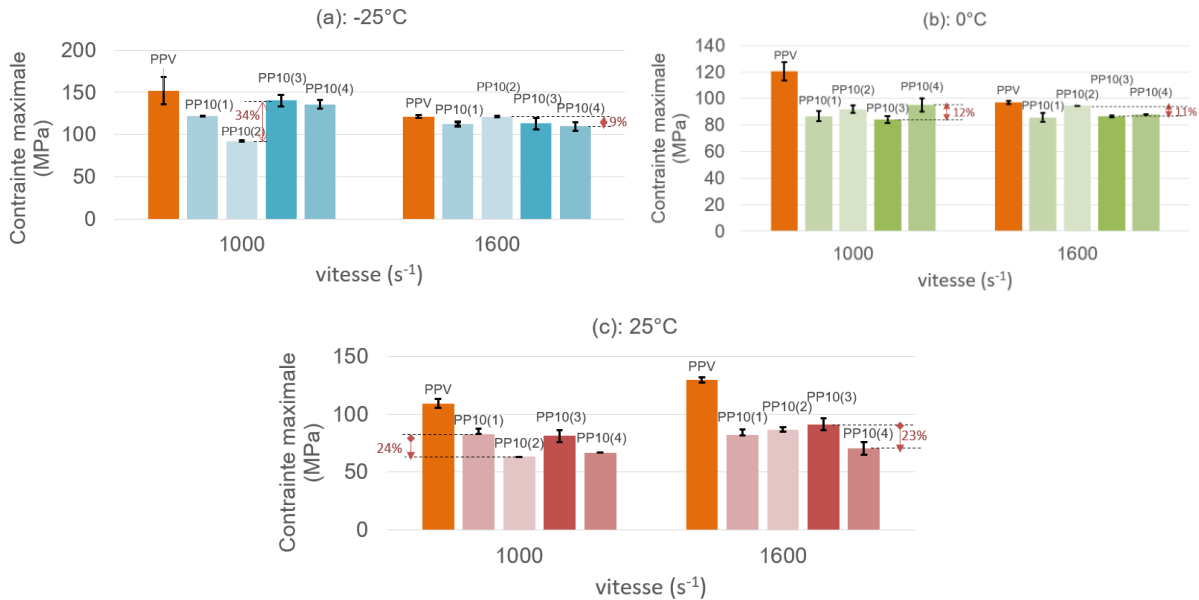


Fig. 12. Comparaison entre les lots différents lot de PP10 recyclés, Contraite maximale : (a) -25°C, (b) 0°C, (c) 25°C.

#### 4. Conclusion

Les essais de compression dynamique menés dans ce travail sur des PP régénérés de différents grades et à différentes températures ont mis en évidence la dépendance des propriétés mécaniques à la température. Le module de compression, la contraite à la limite élastique et la contraite maximale diminuent avec l'augmentation de la température. Contrairement au PP pur, les propriétés mécaniques en compression dynamique des PP recyclés à partir de différents types de gisement de déchets ne sont pas reliées aux grades dû à l'impact non négligeable des adjuvants et contaminants. Malgré l'origine déchet des PP recyclés, des propriétés répétables ont été obtenues. Les efforts de tri, la maitrise des processus de recyclage et les additifs ajoutés permettent d'obtenir des caractéristiques mécaniques globalement reproductibles, à longue terme, malgré l'origine déchet des matériaux.

## Remerciements

Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés dans le cadre du projet collaboratif ECOTREVE qui porte sur l'élaboration de nouveaux matériaux composites thermoplastiques à partir de matières plastiques et composites recyclées. Nous remercions vivement la Région Grand Est, Euro Métropole et l'ADEME pour le soutien financier de cette étude. Nous remercions chaleureusement toute l'équipe du projet ECOTREVE : le centre technologique 'Cetim-Cermat Mulhouse', le laboratoire « IS2M » Mulhouse et nos collaborateurs industriels 'Paprec plastiques', 'Plastiform' et 'Airepur' pour les riches discussions au cours des réunions de projet.

## Références

- [1] H. Jmal, N. Bahlouli, C. Wagner-Kocher, D. Leray, F. Ruch, J-N. Munsch and M. Nardin, "Influence of the grade on the variability of the mechanical properties of polypropylene waste," *Waste Manag.*, 2018, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.006>.
- [2] C. Maier and T. B. T.-P. Calafut, Eds., "Copyright," in *Plastics Design Library*, Norwich, NY: William Andrew Publishing, 1998, p. ii.
- [3] J. Aurrekoetxea, M. A. Sarrionandia, I. Urrutibeascoa, and M. L. Maspocho, "Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene," *J. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 11, pp. 2607–2613, 2001.
- [4] G. Guerrica-Echevarria, J. I. Eguiazabal, and J. Nazabal, "Effects of reprocessing conditions on the properties of unfilled and talc-filled polypropylene," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 53, no. 1, pp. 1–8, 1996.
- [5] M. P. Luda, G. Ragosta, P. Musto, D. Acierno, G. Camino, A. Recca and N. Valeriano, "Natural Ageing of Automotive Polymer Components: Characterisation of New and Used Poly(propylene) based Car Bumpers," *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 287, no. 6, pp. 404–411, 2002.
- [6] M. P. Luda, G. Ragosta, P. Musto, A. Pollicino, D. Acierno, L. Di Maio, G. Camino and N. Valeriano, "Regenerative Recycling of Automotive Polymer Components: Poly(propylene) Based Car Bumpers," *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 288, no. 8, pp. 613–620, 2003, <http://dx.doi.org/10.1002/mame.200300001>.
- [7] D. Pessey, N. Bahlouli, S. Patoffatto, and S. Ahzi, "Polymer composites for the automotive industry: characterisation of the recycling effect on the strain rate sensitivity," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 13, no. 4, pp. 411–424, 2008.
- [8] C. Rogueda-Berriet, N. Bahlouli, D. Pessey, and Y. Rémond, "Mechanical Behavior of Recycled Polypropylene Composites Under Tensile, Bending, and Creep Loading: Experimental and Modeling," *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 133, no. 3, p. 30907, 2011.
- [9] K. Wang, F. Addiego, N. Bahlouli, S. Ahzi, Y. Rémond, V. Toniazzo and R. Muller, "Impact response of recycled polypropylene-based composites under a wide range of temperature: Effect of filler content and recycling," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 95, pp. 89–99, 2014.
- [10] K. Wang, F. Addiego, N. Bahlouli, S. Ahzi, Y. Rémond, and V. Toniazzo, "Analysis of thermomechanical reprocessing effects on polypropylene/ethylene octene copolymer blends," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 97, no. 8, pp. 1475–1484, 2012.
- [11] N. Bahlouli, D. Pessey, C. Raveyre, J. Guillet, S. Ahzi, A. Dahoun and J-M. Hiver, "Recycling effects on the rheological and thermomechanical properties of polypropylene-based composites," *Mater. Des.*, vol. 33, pp. 451–458, 2012.
- [12] J. Ingram, Y. Zhou, S. Jeelani, T. Lacy, and M. F. Horstemeyer, "Effect of strain rate on tensile behavior of polypropylene and carbon nanofiber filled polypropylene," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 489, no. 1–2, pp. 99–106, 2008.
- [13] J. W. Teh, A. Rudin, and J. C. Keung, "A review of polyethylene–polypropylene blends and their compatibilization," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–23, 1994.
- [14] S. Bertin and J.-J. Robin, "Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends," *Eur. Polym. J.*, vol. 38, no. 11, pp. 2255–2264, 2002.
- [15] J. Richeton, S. Ahzi, K. S. Vecchio, F. C. Jiang, and R. R. Adharapurapu, "Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield stress," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, no. 7–8, pp. 2318–2335, 2006.
- [16] H. H. Kausch, *Matériaux Polymères: Propriétés Mécaniques et Physiques*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001.
- [17] G. W. Ehrenstein, *Matériaux polymères : structure, propriétés et applications*, 2e éd. 2000.
- [18] L. Yu and Y. Ma, "Loading rate and temperature dependence of flexural behavior in injection-molded glass fiber reinforced polypropylene composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 161, pp. 285–299, 2019.