

Caractérisation mécanique d'un bio-composite PP/CNA : Homogénéisation numérique et expérimentale

Hajar AKHZOUZ^{1,2}

Hanane ELMINOR²

ElMokhtar HILALI¹

Hassan ELMINOR¹

¹ Equipe de recherche Matériaux, Mécanique et Génie Civil ENSA Agadir Maroc

² Laboratoire d'Innovation Durable et de Recherche Appliquée (L.I.D.R.A)-Universiapolis Agadir Maroc

RESUME :

Cette travail a pour objectif l'étude des comportements macroscopiques des microstructures bidimensionnelles hétérogènes d'un bio composite à base de la coque de noix d'arganier (CNA). Elle met en évidence l'intérêt d'une détermination rigoureuse de la taille optimale du volume élémentaire représentatif (VER) d'une microstructure et ce, par le biais de plusieurs paramètres à savoir : la fraction volumique, le contraste, le type de la propriété et la morphologie de l'hétérogénéité.

1. INTRODUCTION

L'objectif principal de ce travail est l'étude de la microstructure Bidimensionnelle (2D) d'un bio-composite chargé de granulats naturels. Le bio-composite est constitué d'une matrice polypropylène (PP), renforcée par des granulats naturels de la coque de noix d'arganier (GCNA). Les particules de la CNA présentent une forme irrégulière et une structure poreuse. Par conséquent, avec cette morphologie les particules peuvent être dispersées dans la matrice polymère de manière plus homogène.

Deux approches d'homogénéisation seront utilisées dans cette étude. Une approche expérimentale basée sur des essais de tractions réalisés sur trois gammes de bio composites (Tab. II). Une deuxième approche numérique basée sur la méthode des éléments finis multi-échelle développée en utilisant le code de calcul Zébulon. Les résultats des deux approches seront présentés.

2. CONTEXTE

1. Mise en œuvre du Bio composite PP/CNA

Le bio composite utilisé dans ce travail est composé d'une la matrice polymère PP (des produits chimiques d'Exon Mobil,) avec une densité de 0.9 g/cm³ et de température de fusion de 165 °C et des particules naturelles (CNA : Coque du Noix d'Arganier).

La composition chimique des coques de noix d'arganier est présentée dans le Tableau 1.

| | Cellulose (%) | Hémicelluloses (%) | Lignine (%) | Cendre(%) |
|-------------------|---------------|--------------------|-------------|-----------|
| Coques d'Arganier | 25.7 | 34.3 | 34.5 | 5.4 |

Tab. I. - Composition chimique de coques de Noix d'arganier [2]

La caractérisation avec la granulométrie laser ainsi que le microscope électronique à balayage ont permis la détermination de la distribution de taille des particules de coques de noix d'arganier, et ce, en termes de diamètre (Fig.I).

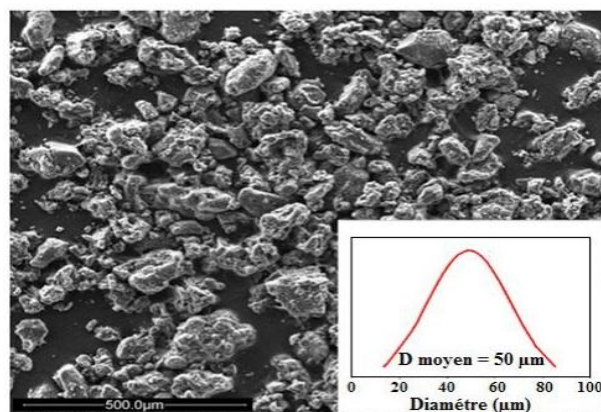


Fig. I. - Distribution de taille de particules de CNA

2. Essais expérimentaux

Les essais de tractions sont menés sur trois gammes de bio-composites selon la norme ISO 527-3 à une vitesse de traction de 3mm/min en utilisant une cellule de charge de 5kN sans extensomètre.

| Gamme 1 | | Gamme 2 | | Gamme3 | |
|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| Taille (μm) | Charge en poids (%) | Taille (μm) | Charge en poids (%) | Taille (μm) | Charge en poids (%) |
| D<125 | 20 | 125<D<160 | 20 | 160<D<250 | 20 |
| 125<D<160 | 60 | 160<D<250 | 60 | 250<D<315 | 60 |
| 160<D<250 | 20 | 250<D<315 | 20 | 315<D<360 | 20 |

Tab. II - Distribution des particules de CNA

Des séries de 10, 15, 20 et 25 en poids. % des particules de CNA appartenant à chaque gamme. A travers cette technique on détermine les caractéristiques suivantes :

- Le module de Young (E en MPa) ;
- Contrainte maximale à la rupture ;
- Allongement à la contrainte maximale.

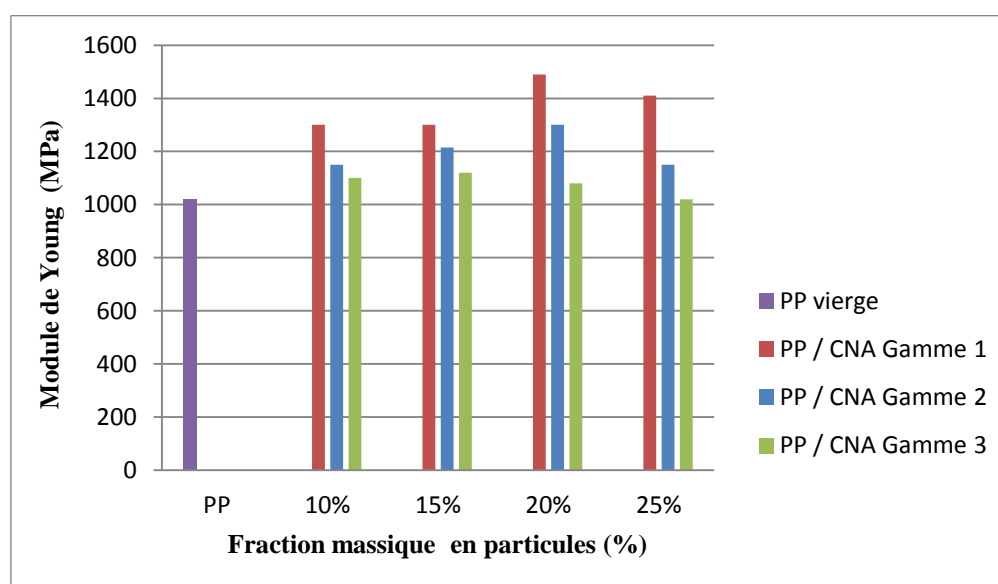


Fig.II – La variation du module de Young en traction des bio-composites en fonction de la taille des particules et la concentration massiques

Les résultats d'essai montrent que le Module de Young augmente progressivement avec l'augmentation de la concentration des CNA jusqu'à un maximum puis il diminue. D'autre part, tous les bio-composites présentent un module de Young supérieur à celui du PP pur (1034MPa), ce qui montre que les CNA jouent le rôle de renfort [3]. Dans cette étude il a été observé que la taille (diamètre) des particules influence significativement les propriétés mécaniques en traction des bio-composites. Le module de Young diminue avec l'augmentation du diamètre des particules. Les résultats montrent que les bio-composites à base des particules des groupes 1 et 2 atteignent leur maximum en module de Young à 20%, avec un gain de 42.65% et 25.72, respectivement, par contre les bio-composites à base des grandes particules (groupe 3) donnent une valeur maximale de 1129,1MPa à 15%.

La contrainte maximale à la rupture, quant à elle, diminue avec l'ajout des particules et avec l'augmentation de la taille des particules. La contrainte maximale à la rupture des bio-composites est nettement inférieure à celle du PP pur (25 MPa), ce qui est normal vu que la présence des CNA augmente les zones de concentration de contrainte autour des particules diminuant la répartition des contraintes entre le polymère et les particules et conduisent à une rupture des bio-composites.

3. Homogénéisation numérique

La génération, la visualisation 2D et le maillage de microstructures aléatoires sont développés. On considère Une microstructure contenant des inclusions sans aucun contact entre eux. Les algorithmes de la morphologie mathématique ont été utilisés pour générer ces microstructures. Le matériau virtuel étudié est un matériau hétérogène biphasé (PP+CNA), constitué d'une matrice renforcée par des inclusions de forme sphérique. La distribution des inclusions dans l'espace est aléatoire. Chaque phase est considérée linéaire élastique et homogène. Cela sous-entend que les inclusions sont bien dispersées dans la matrice et elles ont toutes les rayons variables regroupés en trois gammes (Fig.III). Une distance de répulsion entre les inclusions est imposée pour les microstructures de type schéma de sphères dures (particules non-interconnectées)

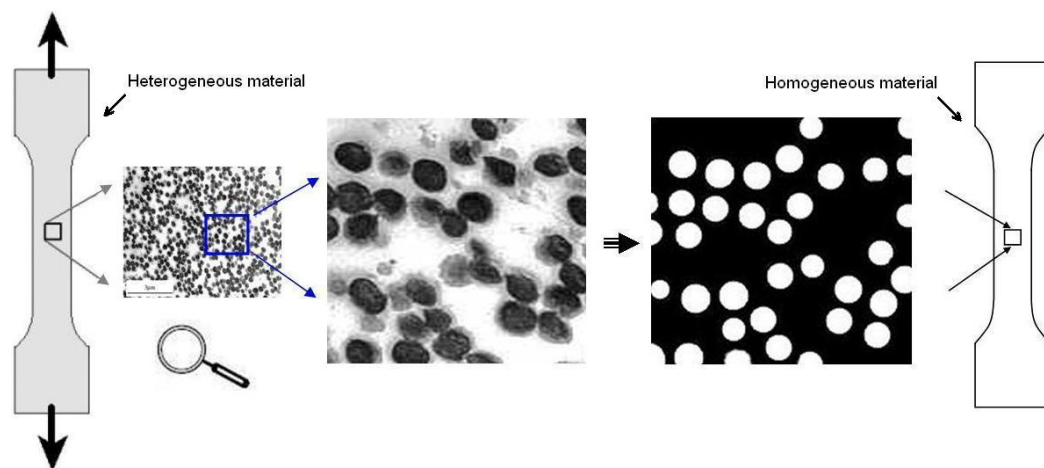


Fig.III - Microstructures aléatoires 2D : schéma de sphères dures.

La taille des éprouvettes en traction utilisées pour prédire le comportement du matériau choisi est suffisamment large pour prédire le comportement mécanique globale. D'autre part, il s'agit d'une modélisation numérique par éléments finis multi-échelle développée par le biais du code de calcul Zébulon. On supposera la structure à deux phases : Matrice PP et inclusion CNA sans introduire l'effet de la porosité, en supposant le comportement élastique.

La technique de sous-volumes, développée dans [4] a été utilisée. En effet le VER statistique est défini par **Jean (2009)** puis **Willot and Jeulin (2009)**[5] et **El Moumen et al. (2013)**[6] comme le volume pour lequel une seule réalisation est suffisante pour déduire un comportement macroscopique. La méthode statistique développée par **ElMoumen** [4] montre que pour Le VER statistique est d'une valeur approximative de $V = 9.5 \text{ cm}^3$, approximativement un cube de longueur de 2.2 cm. Ce VER statistique est le volume minimum pour avoir la représentativité des résultats. Dans le présent travail, le VER proposé est largement supérieur au VER statique minimal.

3. RESULTATS

La présente étude cherche à mettre l'accent sur l'influence des particules de la CNA sur la taille du VER et sur la variation des paramètres statistiques de la microstructure. La validation des résultats se fait par la comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement avec les valeurs numériques. Les exemples des courbes présentés (Fig.VI et Fig.V) montrent la variation des modules d'Young Numériques et Expérimentaux en fonction de la fraction volumique des inclusions du bio-composite PP-CNA.

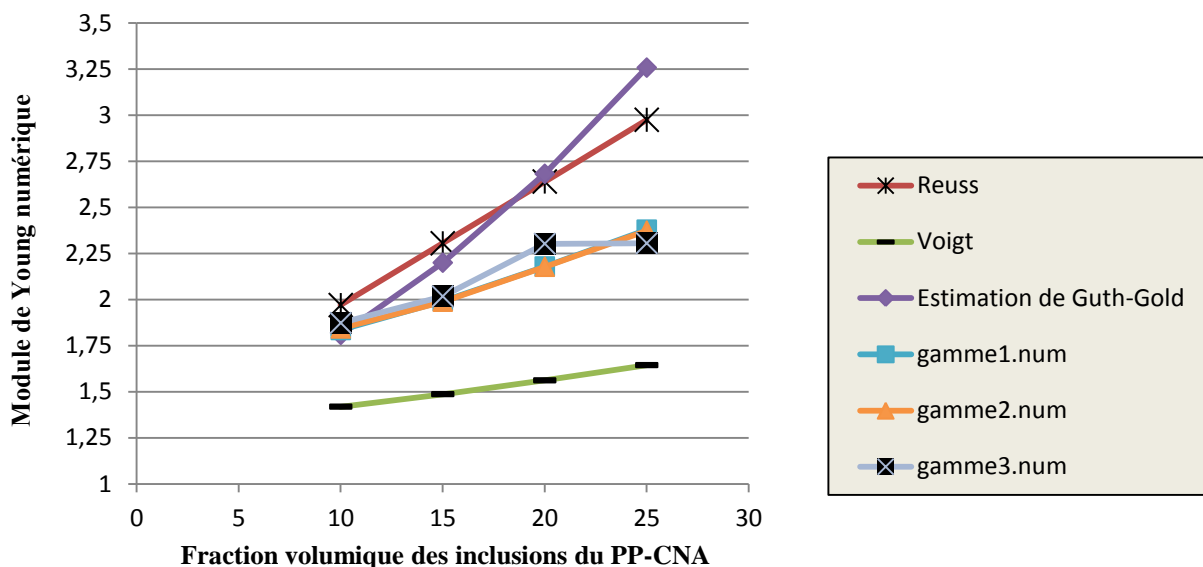


Fig. VI.- Variation des modules d'Young numériques et les modèles analytiques en fonction de la fraction volumique des inclusions du bio-composite PP-CNA

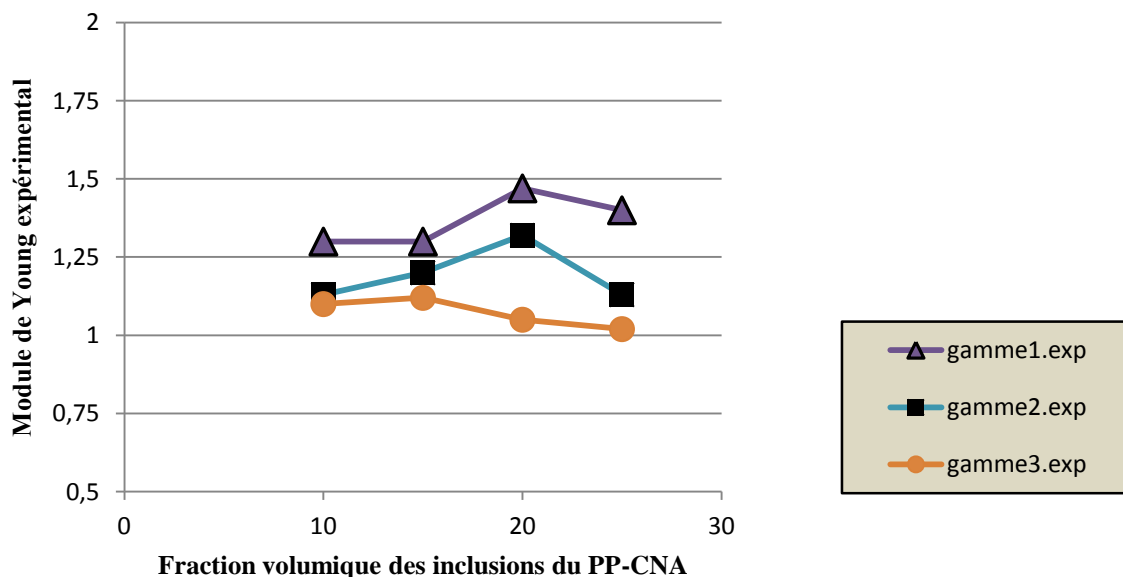


Fig. V.- Variation des modules d'Young Expérimentaux en fonction de la fraction volumique des inclusions du bio-composite PP-CNA

D'après les résultats obtenus, nous constatons que :

- Le Module de Young augmente progressivement avec l'augmentation de la concentration des CNA jusqu'à un maximum puis il diminue.
- Les bio-composites à particules ayant le plus petit diamètre ont les meilleures propriétés mécaniques.
- La contrainte maximale à la rupture, quand elle, diminue avec l'ajout des particules et avec l'augmentation de la taille des particules.

En comparant les résultats numériques, analytique à ceux expérimentaux, on constate que seul le module de Young calculé par **Voigt** [1] est le plus proche des valeurs expérimentales.

La divergence des résultats numériques et expérimentaux peut être expliquée par le fait d'une part que les échantillons expérimentaux, utilisés par **Essabir et al. (2013)**[3], ont un volume de 1.6 cm^3 , approximativement un cube de longueur de 1.2 cm , très inférieur au VER statistique minimal qui est de $V = 9.5 \text{ cm}^3$. D'autre part la mauvaise mouillabilité entraîne des interactions particules-particules donnant naissance aux agglomérations des particules ce qui augmente la concentration des contraintes autour de ces points d'agglomération [3,7]. Une homogénéisation à deux étapes est très souhaitable dans ce cas tenant compte de la porosité présente dans la matrice.

4. CONCLUSION

L'application de la méthode d'homogénéisation numérique combinée à des approches analytiques et statistique sur un bio composite constitué d'une matrice polypropylène (PP), renforcée par des granulats naturels de la coque de noix d'arganier (GCNA) montre une chute de rigidité qui peut être expliquée par l'incompatibilité charge-matrice et la présence des pores observés par microscope. Une homogénéisation à deux étapes est alors fortement recommandée, tenant compte de la porosité et de la fraction volumique totale.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] W.Voigt.Lehrbuch der Kristallphysik. Teubner Berlin, 1910.
- [2] Thèse « Bio-composites à base de coque de noix d'arganier : Mise en oeuvre, caractérisation et modélisation du comportement mécanique » par H.Essabir.
- [3] Essabir H, Nekhlaoui S, Malha M, Bensalah MO, Arrakhiz FZ, Qaiss A, Bouhfid R (2013). Mater Des 51:225–230.
- [4] Thèse « Prédiction du comportement des matériaux hétérogènes basée sur l'homogénéisation numérique : modélisation, visualisation et étude morphologique » par Ahmed Elmoumen.
- [5] Willot, F., Jeulin, D., 2009. Elastic behavior of composites containing boolean random sets of inhomogeneities. Int. J. Eng. Sci. 47.
- [6] A. El Moumen, T. Kanit, A. Imad, H. El Minor, Mech. Res. Commun. 53 (2013).
- [7] J. Paiboon, D.V. Griffiths, J. Huang, G.A. Fenton, Int. J. Solids Struct. 50 (2013).