

COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN COMPOSITE VERRE EPOXY UTILISES DANS LES PALES EOLIENNES: COMPARAISON DE MODELES THEORIQUES

R. NOURI¹, A. BAHLAOUI¹, M. SAMMOUDA¹, S. BELHOUIDEG^{1*}

1. Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Sciences et Techniques (LIRST), Département de Physique, Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni-Mellal, Maroc.

*Auteur correspondant : soufianebelhouideg@gmail.com

Résumé

L'efficacité de l'énergie éolienne dépendent de la fiabilité et de la longévité des pâles de l'éolienne. Ces pâles sont généralement fabriquées à partir des matériaux composites. Il s'agit des matériaux composites constitués d'une matrice polymère (appelée résine) renforcée par des fibres de verre. Les techniques d'homogénéisation sont utilisées pour estimer les caractéristiques mécaniques des pâles d'une telle éolienne. L'influence des divers facteurs tels que la teneur en fibres, la géométrie des fibres et la taille de la fibre sur les propriétés mécaniques seront présentés dans cette étude.

Mots clefs : *Pâle d'une éolienne, matériaux composites, optimisation, homogénéisation, comportement mécanique.*

1. Introduction

L'énergie éolienne est sans aucun doute l'une des formes la plus propre d'énergie à partir d'une source renouvelable qui peut remplacer l'énergie fossile. Elle est actuellement la technologie de production d'énergie installée qui a la plus forte croissance. Le marché de l'énergie éolienne est en plein développement et il a été devenu un marché très concurrentiel. Selon les statistiques, il est estimé que l'énergie éolienne pourrait fournir environ 12% de l'offre mondiale d'électricité d'ici 2020, et il peut dépasser 20% d'ici 2030 [1]. Comme le secteur de l'énergie éolienne se développe, une gestion plus attentive des coûts est exigée [2].

L'éolienne est un système mécatronique typique. Il se compose de nombreux composants mécaniques et électriques, dont on peut citer : les pâles, rotor, boîte de vitesses, arbre, générateur, roulements... [1]. Parmi ces composants, les pâles sont considérées comme l'un des composants les plus critiques [3], parce que l'efficacité de l'éolienne dépend de ses pâles. En outre, le coût de fabrication des pâles représente 15-20% du coût total d'une éolienne. Afin de réduire le coût de l'énergie éolienne, la réduction du coût de fabrication des pâles est fortement nécessaire. De plus, les matériaux composites sont largement utilisés pour fabriquer les pâles d'une éolienne [4], en raison de leurs excellents avantages tels

que le faible coût, poids léger, rapport résistance-poids et rigidité-poids très élevés [5]. Aujourd'hui, la plupart des pâles d'éolienne sont fabriquées d'une matrice polymère renforcée par des fibres de carbone ou de verre.

Dans le but d'optimiser la conception et la fabrication des pâles d'éolienne, les outils de prévision du comportement mécanique ont été utilisés. Ces outils sont classiquement basés sur des méthodes d'homogénéisation. Après une brève présentation du matériau utilisé dans cette étude, les principes fondamentaux de l'homogénéisation et plus particulièrement l'approche de Mori-Tanaka [6], schéma dilué [7] et schéma auto-cohérent [8] sont exposés. Ensuite, des études paramétriques permettent de mettre en évidence l'influence de teneur en fibres et la géométrie des fibres sur les propriétés mécaniques de composites Verre-Epoxy sont présentées.

2. Matériau Verre-Epoxy

2.1 Résine Epoxy

La résine époxy est un polymère thermodurcissable très utilisé dans l'industrie, qui a une résistance efficace, une bonne ténacité et une résilience appréciable. Elle a une bonne résistance à l'humidité et aux attaques chimiques. Elle a également de bonnes propriétés d'isolation électrique. Elle peut être durcie à la température ambiante, sans aucune pression à l'aide d'un agent de durcissement ou elle peut être durcie à la chaleur. La résine époxy a une excellente adhésion sur un bon nombre de matériaux comme le bois, les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres naturelles et le métal. Les propriétés mécaniques de la résine époxy sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1: Propriétés mécaniques de la résine époxy

Module d'élasticité [GPa]	Module de cisaillement [GPa]	Coefficient de Poisson [-]	Densité [g/cm ³]
3,4	1,2	0,4	1,10

2.2 Fibre de verre

Les fibres de verre sont parmi les matériaux industriels les plus polyvalents et les plus connus aujourd'hui. Ils sont facilement fabriqués à partir de matières premières,

qui sont disponibles en grande quantité. Elles présentent des propriétés utiles telles que la dureté, la résistance à l'attaque chimique et la stabilité. Ainsi, elles possèdent de bonnes propriétés telles que la résistance, la flexibilité et la rigidité. Les fibres de verre sont utilisées dans la fabrication de structures composites, cartes de circuits imprimés et une large gamme de produits à usage spécifique. Les propriétés mécaniques de fibre de verre sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2: Propriétés mécaniques de la fibre de verre

Module d'élasticité [GPa]	Module de cisaillement [GPa]	Coefficient de Poisson [-]	Densité [g/cm ³]
72	29	0,25	2600

3. Estimation du comportement élastique de composite Verre-Epoxy

Les techniques d'homogénéisation sont utilisées pour estimer les propriétés mécaniques de composites verre-époxy. Ces techniques consistent à caractériser le comportement effectif macroscopique du milieu hétérogène réel en connaissant les propriétés des constituants et leurs distributions spatiales. Cette démarche permet d'identifier les grandeurs qui conditionnent le comportement macroscopique.

3.1 Schéma dilué

C'est à Eshelby que l'on doit les premiers résultats de la méthode des approximations diluées [7]. Cette technique est dédiée à des matériaux présentant un faible taux d'inclusions (ou de fibres). Le tenseur de rigidité homogénéisé est donné par l'expression suivante :

$$C_{dl} = C_m + \sum_{r=2}^N f_r (C_r - C_m) : A^{dl} \quad (1)$$

Avec :

$$A^{dl} = [I + S_r : (C_m)^{-1} : (C_r - C_m)]^{-1} \quad (2)$$

Où S_r représente le tenseur d'Eshelby, C_r le tenseur de rigidité du renfort, C_{dl} le tenseur de rigidité équivalent de la solution diluée, C_m le tenseur de rigidité de la matrice, A^{dl} le tenseur de localisation des déformation de phase de la solution diluée, f_r la fraction volumique des renfort et I le tenseur identité d'ordre quatre.

3.2 Schéma de Mori-Tanaka

Le schéma de Mori-Tanaka [6] prend en compte l'interaction entre les inclusions dans le processus d'estimation de tenseur de rigidité macroscopique. Le principe de ce schéma est de considérer l'hétérogénéité ellipsoïdale immergée dans la matrice solide soumise, non plus à la déformation macroscopique mais à sa déformation qu'il s'agira de déterminer. Le tenseur de rigidité homogénéisé en utilisant la méthode de Mori-Tanaka est donné par la relation ci-dessus :

$$C_{mt} = \sum_{ph=1}^N f_{ph} C_{ph} : A_{ph}^{dl} : \left[\sum_{ph=1}^N f_{ph} A_{ph}^{dl} \right]^{-1} \quad (3)$$

Où C_{mt} représente le tenseur de rigidité équivalent de Mori Tanaka, A_{ph}^{dl} le tenseur de localisation des déformations de la phase ph de la solution diluée, C_{ph} le tenseur de rigidité de la phase ph et f_{ph} la fraction volumique de la phase ph .

3.3 Schéma Auto-Cohérent

Cette approche est à nouveau basée sur le modèle d'inclusion d'Eshelby. L'hypothèse forte de ce modèle consiste à dire que chaque inclusion est entourée par un milieu continu équivalent dont le tenseur des rigidités est égal au tenseur des rigidités effectives globales C^{ac} inconnues. L'estimation du tenseur des rigidités effectives du composite est donc :

$$C_{ac} = C_m + \sum_{r=2}^N f_r (C_r - C_m) : A_r^{ac} \quad (4)$$

Avec :

$$A_r^{ac} = [I + S_r : (C_{ac})^{-1} : (C_r - C_{ac})]^{-1} \quad (5)$$

Où C_{ac} représente le tenseur de rigidité équivalent de schéma Auto-Cohérent et A_r^{ac} le tenseur de localisation des déformations de schéma Auto-Cohérent.

4. Résultats et discussion

4.1 Effet de teneur en fibres

L'addition de fibres affecte la matrice époxy de composite de deux manières. Tout d'abord, il réduit les coûts de matériaux composites et améliore les propriétés mécaniques des composites. La matrice époxy et la fibre de verre sont considérées isotropes. Les renforts sont de formes sphériques. La figure 1 illustre l'évolution du module d'Young équivalent en fonction de la fraction volumique de renfort. L'augmentation de la teneur en fibres de verre dans la matrice époxy améliore les propriétés mécaniques. Le module d'Young augmente de 129 % lorsque la fraction volumique de fibre passe de 10 % à 50% pour le schéma de Mori-Tanaka.

Le module d'Young de composite verre-époxy a été mesuré expérimentalement pour un taux de renfort de 60% [9], et il est égal $E = 12,6$ GPa. L'erreur relative entre le module d'Young prédit par le schéma de Mori-Tanaka, schéma dilué, schéma auto-cohérent et le module d'Young mesuré est respectivement de 3,7 %, 40,4 % et 98,4 %. On constate que le modèle de Mori-Tanaka donne une meilleure approximation de module d'Young.

La plupart des schémas d'homogénéisation classiques sont valables pour des taux de porosité faibles (inférieurs à 20 %). Pour des taux de porosités plus élevés, des problèmes dus à l'interaction entre les inclusions commencent à apparaître. Pour améliorer la prévision des propriétés mécaniques, un processus itératif doit être

utilisé. Ce processus consiste à augmenter progressivement le taux de renfort, afin qu'à chaque étape le taux de renfort ajouté reste faible.

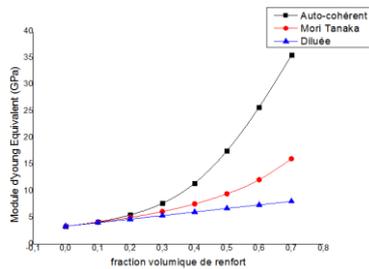


Figure 1: Effets de la teneur en fibres de verre sur les propriétés mécaniques du composite Verre-Epoxy

4.2 Effet de la géométrie de la fibre

La démarche d'homogénéisation est mise en œuvre dans le but d'évaluer l'influence de la morphologie de fibres sur les propriétés macroscopiques et sur le degré d'anisotropie macroscopique du matériau verre-époxy. Afin d'étudier l'influence de la géométrie de la fibre qui a une forme ellipsoïdale, on a supposé que les ellipses sont toutes alignées entre elles suivant le plan (XOY). Le rapport d'aspect ou de forme w d'une inclusion ellipsoïdale (cf. figure 2) est défini par :

$$w = \frac{c}{a} \quad (6)$$

Des calculs pour les trois types de fibre ont été réalisés (cf. figure 3).

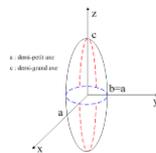


Figure 2: Schéma d'une inclusion ellipsoïdale

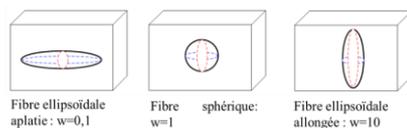


Figure 3: Les trois types de fibres

Les principaux résultats se sont présentés sur la figure 4 dans le cas du schéma de Mori-Tanaka. Il est vérifié que le milieu homogénéisé est isotrope transverse dans le cas des fibres ellipsoïdales et isotrope pour le cas de fibres sphériques. De plus, ces résultats soulignent l'importance de la forme des fibres sur le comportement macroscopique du matériau composite verre-époxy. En effet, pour une fraction volumique de fibre de 60 %, le module d'Young E_1 , varie de 50,7 % lorsque le rapport de forme passe de $w = 0,1$ à $w = 10$.

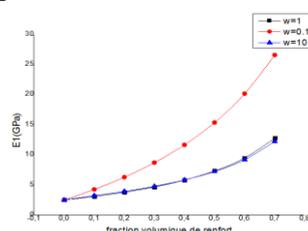


Figure 4: Module d'Young E_1 en fonction de fraction volumique de renfort et pour différents rapports de forme par le schéma de Mori-Tanaka

5. Conclusion

La démarche, présentée dans cette étude, propose un outil d'homogénéisation pour l'évaluation des propriétés élastiques macroscopiques de composite verre-époxy. Schéma de Mori-Tanaka, schéma dilué et schéma auto-cohérent ont été adoptés pour leurs efficacités. Une comparaison avec les mesures expérimentales montre que le schéma de Mori-Tanaka fournit des prédictions proches de l'expérience. Aussi, les résultats obtenus montrent que les propriétés mécaniques de composite verre-époxy dépendent notablement de la géométrie de fibre et de son taux volumique. En fin, pour améliorer davantage la prédiction de propriétés mécaniques de composite verre-époxy, les schémas d'homogénéisation classiques seront couplés à un processus itératif dans une étude ultérieure.

Références

- [1] W.Y. Liu, B.P. Tang, J.G. Han, X.N. Lu, N.N. Hu, Z.Z. He, *The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: a review*, Renewable & Sustainable Energy Reviews vol. 44 (2015) pp. 466–472.
- [2] G. Guandalini, S. Campanari, M.C. Romano, *Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: energy and economic assessment*, Applied Energy vol. 147 (2015) pp. 117–130.
- [3] B. Yang, D. Sun, *Testing, inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: a survey*, Renewable & Sustainable Energy Reviews vol. 22 (2013) pp. 515–526.
- [4] O.T. Thomsen, *Sandwich materials for wind turbine blades present and future*, Journal of Sandwich Structures & Materials vol. 11 (2009) pp. 7–26.
- [5] K.B. Katnam, A.J. Comer, D. Roy, L.F.M. da Silva, T.M. Young, *Composite repair in wind turbine blades: an overview*, The Journal Of Adhesion vol. 91 (2015) pp. 113–139.
- [6] T. Mori, and K. Tanaka, *Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions*, ACTA Metallurgica vol. 21 (1973) pp. 571–574.
- [7] J.D. Eshelby, *The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion and related problems*, Proceedings of the Royal Society of London A vol. 241 (1957), pp. 375–396.
- [8] R. Hill, *A self-consistent mechanics of composite materials*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids vol. 13 (1965) pp. 213–222.
- [9] C. Dong, *Uncertainties in flexural strength of carbon/glass fibre reinforced hybrid epoxy composites*, Composites Part B: Engineering vol. 98 (2016), pp. 176–181.