

# ETUDE NUMERIQUE D'UNE PALE COMPOSITE D'UNE EOLIENNE FLOTTANTE EN SERVICE

H. BOUDOUNIT<sup>1</sup>, M. TARFAOUI<sup>2</sup>, D. SAIFAOU<sup>1</sup>

1. Laboratoire des Energies Renouvelables et Dynamiques des Systèmes, Faculté des Sciences Ain Chock, BP 5366 Maarif, Casablanca, Maroc ; [hichamboudounit@gmail.com](mailto:hichamboudounit@gmail.com) - [ddsaifaoui@gmail.com](mailto:ddsaifaoui@gmail.com)  
 2. Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL) ENSTA Bretagne, 2 Rue François Verny, Brest, FRANCE ; [mostapha.tarfaoui@ensta-bretagne.fr](mailto:mostapha.tarfaoui@ensta-bretagne.fr)

## Résumé

La production de l'électricité, emblème du développement économique, est aujourd'hui au cœur d'une transition énergétique et environnementale. La production d'électricité au Maroc est en effet, le secteur le plus émetteur de CO<sub>2</sub> en raison d'utilisation des énergies fossiles (charbon principalement). L'éolien se conçoit particulièrement comme une solution à fort potentiel dans la contribution à la résolution de cette problématique mais des questions techniques et économiques doivent être résolues. Le sujet de la performance aérodynamique, a été traité assez longuement par divers chercheurs mais l'intégrité structurelle de la pale est un domaine qui vient tout juste de voir le jour. Notre projet est centré sur l'étude des pales des éoliennes industrielles, en particulier nous visons à étudier les performances mécaniques et l'intégrité structurelle d'une pale d'éolienne en utilisant des matériaux composites.

**Mots clés :** *Matériaux composites ; pale d'éolienne, comportement en service, endommagement et rupture ; critère de Hashin.*

## 1. Introduction

Les pales représentent une partie très importante de l'éolienne, elles doivent être robustes pour assurer un bon fonctionnement pendant leurs durées de vie. En effet, au cours des dernières années, de nombreux grands fabricants d'éoliennes ont été touchés par de grands problèmes de pale, allant de défaillances catastrophiques jusqu'à des vastes campagnes de rénovation à cause de la nature du matériau utilisé, la taille de la pale et les conditions d'utilisation de ses derniers. Il existe très peu de fabricants dans le monde capables de produire ces pales qui sont maintenant en fibre de verre et en fibre de carbone « Siemens, Vestas, Gamesa ».

Notre étude propose des stratégies et des solutions pour remédier et réduire les risques de défaillances des pales, maximiser l'efficacité aérodynamique et la robustesse structurelle, ainsi que de réduire la masse de la pale et le coût total de fabrication en utilisant les matériaux composites.

Dans ce papier, nous avons utilisé le code de calcul éléments finis ABAQUS pour simuler l'impact des chargements appliqués à la pale en service (la gravité, la force centrifuge et la vitesse du vent) sur le comportement mécanique et la résistance à l'endommagement. Le déplacement du bout de pale et l'identifiant des zones sensibles et endommagées sont identifiées afin de proposer des solutions viables.

## 2. Expérience et procédure

### 2.1 Matériaux Composite utilisé

Le processus de la conception de la pale est entraîné par les exigences aérodynamiques mais l'économie signifie que la forme de cette dernière est un compromis pour maintenir le coût de construction raisonnable.

La majorité des composants d'éolienne sont réalisés en matériaux renforcés de fibre de verre et de polyester ou une résine époxy, vue sa facilité d'utilisation qui ne nécessite pas de haute technologies, pour son coût raisonnable et ses qualités élastiques.

À nos jours un nouveau matériau prend le relais, les fibres de carbone sont plus robustes et plus légères et leur résistance à la fatigue est bien plus importante, mais leur processus de fabrication est bien plus coûteux.

Dans notre étude nous allons utiliser deux types de matériaux composites afin de faire une comparaison à la fin pour savoir lequel des deux matériaux répond à nos attentes et aux exigences des industrielles.

Les matériaux utilisés ont les propriétés classées dans les tableaux 1 à 5.

E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	ν <sub>12</sub>	G <sub>12</sub>	G <sub>13</sub>	G <sub>23</sub>
24.8	11.5	0.416	4.861	4.861	4.861

**Tableau 1: Propriétés du pli d'une composite fibre de verre matrice époxy**

S <sub>1</sub> <sup>T</sup>	S <sub>1</sub> <sup>C</sup>	S <sub>2</sub> <sup>T</sup>	S <sub>2</sub> <sup>C</sup>	S <sub>12</sub> <sup>F</sup>	S <sub>23</sub> <sup>F</sup>
1250	600	35	141	63	63

**Tableau 2: Propriétés à la rupture du pli d'un composite fibres de verre matrice époxy**

E1	E2	E3	ν 12	ν 13	ν 23	G12	G13	G23
180	9.45	9.45	0.433	0.433	0.466	6.67	6.67	3.23

**Tableau 3: Propriétés du pli d'une composite fibre de Carbone matrice époxy**

$s_1^T$	$s_1^C$	$s_2^T$	$s_2^C$	$s_{12}^F$	$s_{23}^F$
1810	667	64	174	105	105

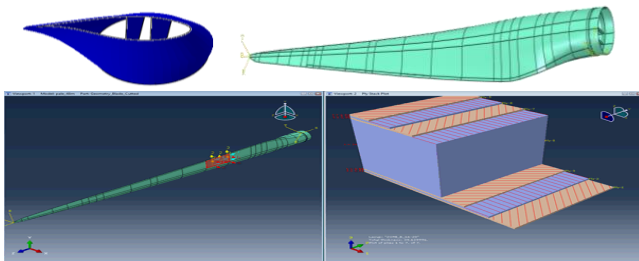
**Tableau 4 : Propriétés à la rupture du pli d'une composite fibre de de Carbone matrice époxy**

E	$\nu$
3.000	0.3

**Tableau 5: Les propriétés élastiques de la colle**

## 2.2 Modèle d'étude

Le modèle à étudier est une pale d'éolienne industrielle de 48 mètres de longueur modélisée en Shell 3D, déformable, avec des longerons en box, La pale est divisée en plusieurs zones pour faciliter la stratification, et l'insertion de matériaux composites, Figure 1.



**Figure 1 : Pale d'éolienne 48m, et le Modèle de stratification**

Le nombre de plis dépend de la zone, il augmente quand on s'approche de la zone de raccordement avec le moyeu, car c'est la partie qui est soumise à plus de forces que tous les autres zones de la pale.

## 2.3 Simulations du comportement d'une pale en service

### 2.3.1 Simulations

Notre étude consiste à déterminer le comportement d'une pale composite quand elle est soumise à des forces aérodynamiques et gravitationnelles, nous nous intéressons d'un côté au déplacement au niveau du pied de pale et à l'endommagement donné par le critère de Hashin, quelle que soit sa position dans l'épaisseur, de façon à établir la taille et la forme de la zone endommagée. Nous nous intéressons aussi à l'effet du matériau composite utilisé pour la construction de notre pale « fibres de verre ou de carbone », afin de comparer les résultats des simulations des deux matériaux.

Pour bien déterminer le comportement de la pale sous une certaine force nous avons procédé comme suit :

- Etude du comportement quand la pale est en arrêt « flambement » pour cela nous avons étudié deux cas une pale à 90° par rapport à l'axe horizontal.
- Etude du comportement sous la force centrifuge
- Etude du comportement sous la force de la gravité « mode arrêt ».
- Etude du comportement sous la force dû à la vitesse du vent : 25m/s et 75m/s « cas de tempête »

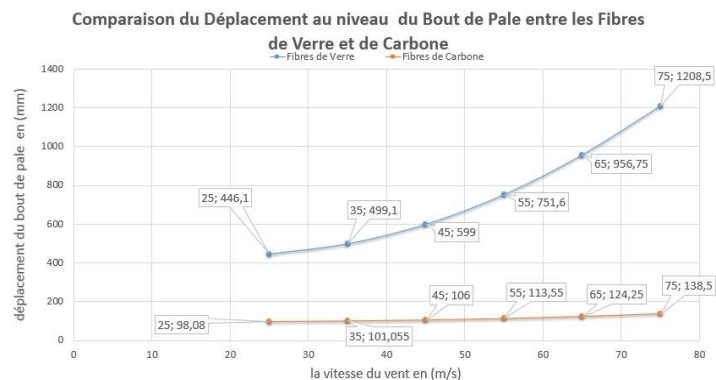
Afin de connaître le comportement de la pale dans les conditions utilisation réelles, nous avons effectué des simulations avec des combinaisons des différentes forces.

Dans un premier temps nous avons effectué des simulations en utilisant des fibres de verre, puis nous les avons refaits avec les mêmes calculs en utilisant les fibres de carbone, afin de déterminer l'effet du matériau de construction.

Les résultats obtenus lors des simulations sont donnés sur les figures 2 à 6. Nous avons présenté ici uniquement les résultats pour une pale soumise à tous les charges « centrifuge-gravité-vent ».

### 2.3.2 Résultats et discussion

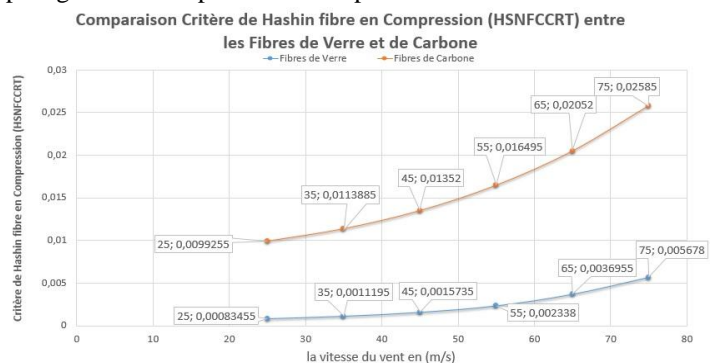
Après l'analyse des résultats, on remarque que le déplacement et l'endommagement de la pale ne sont pas infectés par la taille du maillage utilisée, toute fois le temps nécessaire pour effectuer le calcul diminue à chaque fois qu'on augmente la taille de la maille.



**Figure 2 : Le déplacement au bout de la pale**

Les fibres de Carbone ont une résistance plus importante contre l'endommagement et le déplacement que les fibres de Verre, ce qui est remarquable lors de la comparaison des résultats des deux fibres face à différentes forces, Figure 2.

Dans le cas des fibres de verre et à une vitesse de 75m/s « cas de tempête », il est préférable de mettre l'éolienne en arrêt mode « drapeau » afin de la protéger, car nous avons trouvé des valeurs très importantes d'endommagement et du déplacement en bout de la pale. Les fibres de carbone permettent ainsi de fabriquer des pales frôlant le gigantisme (plus de 120m) pour atteindre des puissances très importantes « plus grande est la pale plus grande est la puissance récupérée ».



**Figure 3 : Critère de Hashin fibre en compression (HSNFCRT)**

La fibre de Verre contrairement à celle du Carbone procure une bonne résistance à la pale pour un critère de dimensionnement basé sur critère de Hashin pour des fibres en compression « HSNFCCRT », Figure 3.

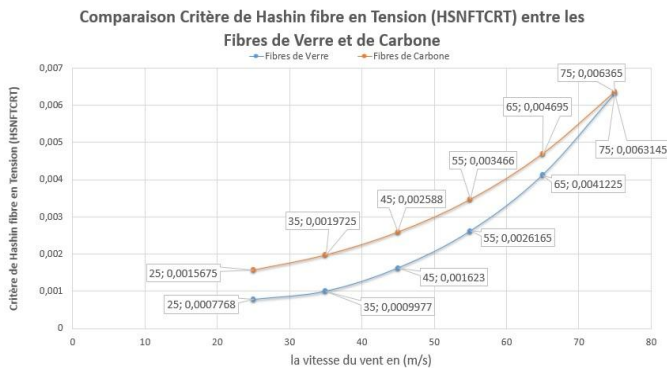


Figure 4 : Critère de Hashin fibre en tension (HSNFTCRT)

A la comparaison des résultats de l'endommagement de type hashin fibre en tension (HSNFTCRT), on remarque qu'à des petites vitesses les fibres de verre sont plus résistant, mais à de très grandes vitesses, les valeurs d'endommagement sont presque similaires donc il est préférable d'utiliser les fibres de carbone dans des zones soumises à de très grandes vitesses de vent, Figure 4.

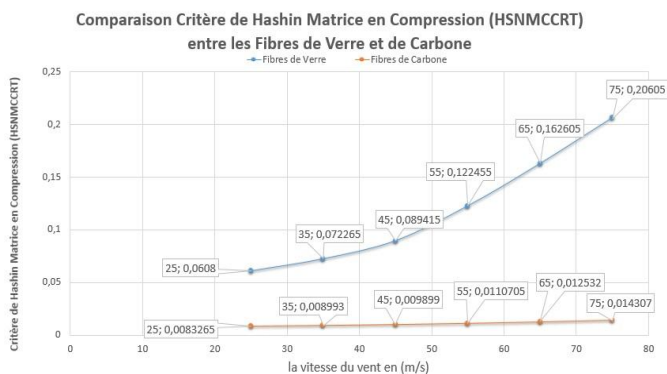


Figure 5 : Critère de Hashin matrice en compression (HSNMCCRT)

Nous constatons d'après le critère de Hashin que l'endommagement de la matrice en tension (HSNMCCRT) et l'endommagement en cisaillement sont les types de dommage le plus prépondérant dans le phénomène d'endommagement, Figure 5.

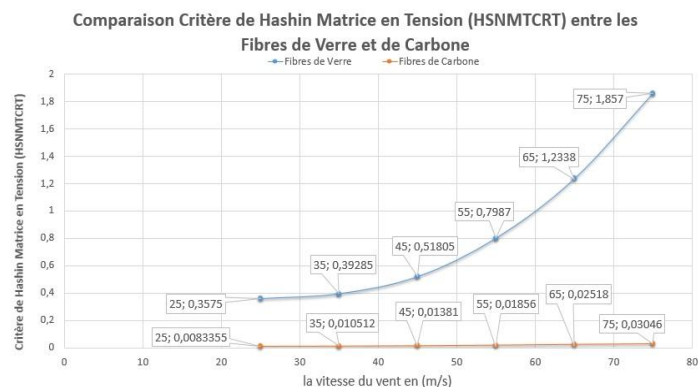


Figure 6 : Critère de Hashin matrice en tension (HSNMTCRT)

Le Carbone a une matrice très résistante à l'endommagement de type compression ou de tension, ce qui est évident lors d'une comparaison des résultats d'endommagement de type Hashin « HSNFCCRT et HSNFTCRT ». Figure 6.

Nous constatons après la visualisation des clichés des simulations que les zones endommagées dans le cas d'utilisation des fibres de verre ne correspondent pas aux mêmes zones endommagées lors de l'utilisation des fibres de carbone, cependant on remarque les fibres de verre ont une grande résistance par rapport à la compression contrairement aux fibres de carbone.

### 3. Conclusion et Perspectives

La comparaison des résultats des simulations nous a permis de connaître le comportement de notre pale composite et de déterminer l'effet du matériau utilisé pour la construction, d'où l'amélioration de la structure de notre pales, et la diminution des endommagements et élimination les défaillances catastrophiques des pales d'où augmentation de sa durée de vie.

Les résultats des simulations montrent qu'il est préférable d'utiliser les fibres de carbone pour la fabrication des pales d'éoliennes destinées à des sites avec de très grandes vitesses du vent

Nous envisageons lors des prochaines simulations étudier le comportement de notre pale composite lors d'un impact avec un objet, et proposer des solutions afin de protéger notre pale des endommagements lors d'une telle situation d'impact.

### Références

- [1] Jing Zhang, Jason Rowland, Damage modeling of carbon-fiber reinforced polymer composite pin-joints at extreme temperatures, Composite Structures, Vol. 94. (2012) 2314–2325,
- [2] Hashin Z Failure criteria for unidirectional fibre composites. ASME Journal of Applied Mechanics, 1980, Vol. 47 (2), pp. 329-334.
- [3] Wenxin Fan, High efficient preparation of carbon nanotube-grafted carbon fibers with the improved tensile strength, Applied Surface Science, Vol. 364(2016) 539–551.
- [4] Joy Pederson, Finite Element Analysis of Carbon Fiber Composite Ripping Using ABAQUS. Clemson, University: All These, Paper 512, 2008.
- [5] Kyle C. Warren, Progressive failure analysis of three-dimensional woven carbon composites in single-bolt, double-shear bearing, Composites Part B, Vol. 84 (2016) 266e276.
- [6] Owaisur Rahman Shah, Identification of structurally sensitive zones subject to failure in a wind turbine blade using nodal displacement based finite element sub-modeling, Renewable Energy 87 (2016) 168e181