

Optimisation du processus de développement des pales d'éoliennes en matériaux composites: Cas d'étude d'un avant-projet

Brahim ATTAF
Fibres de Berre, Marignane.
b.attaf@wanadoo.fr

Résumé:

Vu que l'utilisation de l'énergie éolienne participe directement à la lutte contre la pollution atmosphérique, les gaz à effet de serre et les divers déchets industriels, l'intérêt pour le développement technologique d'éoliennes de plus en plus puissantes est devenu aujourd'hui une préoccupation majeure pour les constructeurs mondiaux. Tandis que la puissance fournie par une éolienne est directement liée à la taille de ses pales (éléments critiques), alors une conception de ces dernières doit faire l'objet de plusieurs investigations. Le but de cet article est de présenter un processus de développement permettant d'optimiser les paramètres matières et procédés utilisés dans la technologie de fabrication des pales d'éoliennes en matériaux composites. Les résultats obtenus permettront d'aboutir à des conclusions satisfaisantes pouvant être exploités par l'industrie éolienne dans le but de réaliser des pales capables de résister, sans aucun effet néfaste, aux conditions sévères d'environnement (rafales) et différents types de chocs auxquelles elles seront exposées durant leur vie.

1. Introduction

Pour minimiser le plus rapidement possible la crise climatique caractérisée par le réchauffement de la planète, la France doit faire appel à de fortes compétences dans le domaine des matériaux composites dans le but d'établir une activité de recherche et développement supportant le programme Eole 2005. Il faut signaler que la France est faiblement positionnée dans ce domaine par rapport à ses voisins européens, car les constructeurs mondiaux d'aérogénérateurs ont vu ces dernières années une course technologique accélérée pour le développement d'éoliennes de plus en plus puissantes; des machines approchant 5 MW de puissance avec un ϕ d'hélice $>$ à 80 m seront prochainement installées en mer (offshore).

Dans l'industrie moderne d'éoliennes, les matériaux composites à base de fibres occupent une place prépondérante (95%), car ils présentent des avantages attractifs résidant considérablement dans les bonnes caractéristiques mécaniques en terme de rigidité spécifique (E/ρ) et résistance spécifique (σ/ρ) associées aux exigences de légèreté, coût objectif et meilleure durée de vie.

Etant donné que la puissance produite par une éolienne dépend fortement de la surface balayée

par les pales en rotation, l'obtention d'une puissance élevée nécessite donc des pales de grandes tailles. Malheureusement, ces dernières sont sujettes, lors de service, à des problèmes de vibrations et de variation de contraintes d'un cycle à un autre provoquant une dégradation de la résistance structurelle à travers les phénomènes d'accumulation de contraintes, de résonance et de fatigue.

2. Procédé de fabrication

Le procédé traditionnel exploité actuellement pour la fabrication des pales d'éolienne est caractérisé principalement par une opération d'assemblage de demi-coquilles par un joint de collage. Cette technique de collage est susceptible de poser des problèmes de résistance mécanique au cours du temps. Alternativement, le procédé de moulage par transfert de résine (RTM) vient positivement pallier cette problématique. Par ailleurs, la maîtrise de quelques paramètres reste à étudier profondément et nécessite des recherches et développement actifs dans ce domaine. Signalons qu'à l'heure actuelle, le procédé attire l'attention de plusieurs industriels, car il ouvre de larges horizons pour la fabrication des pièces de grandes tailles associées à un meilleur compromis performance/masse/coût. Le procédé évolue, mais il reste à savoir à quelle

vitesse il sera pratiquement exploité dans une industrie restée longuement traditionnelle [1].

3. Matériaux et caractérisation

Le matériau choisi doit répondre aux objectifs et besoins souhaités. Il est impératif de choisir:

- La classe des fibres.
- La classe de la matrice.
- La mousse constituant le sandwich (mousse adaptée à la mise en œuvre).

Afin de mesurer avec précision les caractéristiques mécaniques des composites sélectionnés, plusieurs essais de traction, compression, flexion, torsion, délaminage, flambage, contrôle du pourcentage de fibres en volume, etc.. doivent être impérativement réalisés. Les valeurs obtenues seront comparées aux valeurs calculées analytiquement en se basant sur les équations constitutives gouvernant le comportement d'un panneau sandwich avec faces (extrados, intrados) en composite stratifié. Ces équations sont généralement exprimées par la forme matricielle compacte [2, 3] :

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \\ Q \end{Bmatrix}_{x,y} = \begin{bmatrix} A & B & 0 \\ C & D & 0 \\ 0 & 0 & F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa \\ \gamma \end{Bmatrix}_{x,y} \quad (1)$$

où,

$$\{N\} = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix}, \{M\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix}, \{Q\} = \begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix}$$

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{0x} \\ \varepsilon_{0y} \\ \gamma_{0xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial^2 u_0 / \partial x^2 \\ \partial^2 v_0 / \partial y^2 \\ \partial u_0 / \partial y + \partial v_0 / \partial x \end{Bmatrix}$$

$$\{\kappa\} = \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial^2 w_0 / \partial x^2 \\ \partial^2 w_0 / \partial y^2 \\ 2\partial^2 w_0 / \partial x \partial y \end{Bmatrix}$$

$$\{\gamma\} = \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u_0 / \partial z + \partial w_0 / \partial x \\ \partial v_0 / \partial z + \partial w_0 / \partial y \end{Bmatrix}$$

Les moments de flexion (M_x, M_y), le moment de torsion (M_{xy}), les efforts normaux (N_x, N_y) et l'effort de cisaillement (N_{xy}) sont appliqués sur les faces extrados et intrados; par contre les efforts de cisaillement transverse (Q_x, Q_y) sont appliqués au cœur (âme).

Les sous-matrices carrées d'ordre trois $[A_{ij}]$, $[B_{ij}]$, $[C_{ij}]$ et $[D_{ij}]$ ($i,j=1,2,6$) sont définies par la Réf.[4]. Signalons que la sous-matrice carrée d'ordre deux $[F_{ij}]$ ($i,j=4,5$) est parfois rectifiées par des facteurs de correction (γ_{ij}).

4. Sections et dimensions de la pale

En collaboration avec les institutions spécialisées en mécanique de fluide et aérodynamique, le profil standardisé de la pale pourra être déterminé. Ce dernier est défini par son bord d'attaque, son bord de fuite et sa corde. L'évolution de la loi de vrillage le long de l'envergure (rotation du profil par rapport à un axe d'articulation) pourra être améliorée par l'organisme compétent. Toutefois, la terminologie entre la position du centre *élastique* et le centre de *gravité* doit faire l'objet d'une distinction claire. Vient ensuite, la taille de la pale qui doit répondre à un cahier de chargé donné.

5. Analyses structurales (statique et dynamique)

Un calcul rigoureux étant généralement complexe, il est peut être intéressant, dans un premier temps, d'obtenir rapidement des résultats approchés par les méthodes classiques. Le système étudié sera en fait ramené à un système discret, constitué d'une liaison élastique et d'un certain nombre de masses ponctuelles. Ensuite, viennent les méthodes numériques qui consistent à approcher la pale considérée par un modèle numérique qui sera résolu par la Méthode des Eléments Finis (MEF). L'élaboration d'un tel modèle n'est pas toujours simple à cause de la forme complexe de la pale, de l'anisotropie du matériau et du type de chargement. Signalons que cette étape nécessite des ordinateurs et des logiciels de calcul puissants.

En analysant les résultats correspondants à la vérification de la résistance mécanique de la pale, il s'avère qu'il est nécessaire de renforcer la section de la pale par des raidisseurs

longitudinaux [5]. Dans ces conditions, une étude préliminaire doit être entreprise afin de déterminer le nombre des raidisseurs adéquat ainsi que leur position par rapport au bord d'attaque. Restant dans cette idée, Attaf et Hollaway [6, 7] ont développé certains résultats illustrant la possibilité de minimiser, en gardant la masse de la structure constante, le déplacement en flexion d'une plaque composite en verre/époxy, renforcée par un, deux ou trois raidisseurs.

D'autre part, l'analyse des résultats numériques montre que les zones présentant un changement géométrique irrégulier, caractérisé par un passage d'une section circulaire creuse à un profil aérodynamique, montrent la présence d'une concentration de contraintes au niveau des zones de transition (voir Fig.1).

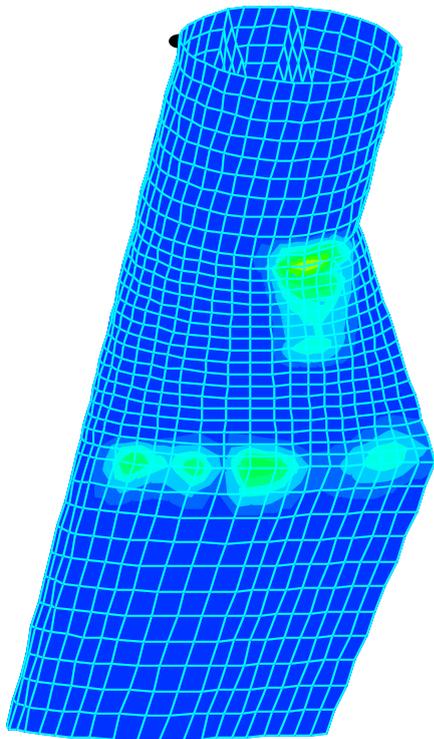


Figure 1 Concentration de contraintes dans la zone de transition sollicitée en traction (pli 9)

Cependant, une attention particulière doit être portée sur cette zone, où le critère de non-rupture de l'un quelconque des plis (k) constituant le stratifié doit faire l'objet d'une vérification, généralement, selon le critère de Tsai-Hill [2], pour un état de contraintes planes ($\sigma_3^{(k)} = \tau_{13}^{(k)} = \tau_{23}^{(k)} = 0$):

$$\Pi = \left(\frac{\sigma_1^{(k)}}{\bar{\sigma}_1^{(k)}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2^{(k)}}{\bar{\sigma}_2^{(k)}} \right)^2 - \frac{\sigma_1^{(k)} \sigma_2^{(k)}}{\left(\bar{\sigma}_1^{(k)} \right)^2} + \left(\frac{\tau_{12}^{(k)}}{\bar{\tau}_{12}^{(k)}} \right)^2 \dots (2)$$

-L'état limite du matériau n'est pas atteint si $\Pi < 1$.

-La rupture du matériau est atteinte si $\Pi = 1$.

Cependant, une marge de sécurité exprimée par $\gamma(\%) = (1 - \Pi) \times 100$ peut être utilisée pour interpréter les résultats d'analyse.

Autre investigation consiste à déterminer, avec une grande précision, la loi d'évolution de l'épaisseur du revêtement (extrados et intrados) le long de l'envergure. Relativement, cette loi peut être définie en fonction de la contrainte maximale en traction le long de l'envergure et la vitesse périphérique.

Ensuite viennent les essais de qualification permettant d'effectuer une vérification de la compatibilité entre le dimensionnement et les charges aérodynamiques auxquelles la pale peut être soumise au cours de service. Une fois que le dimensionnement optimisé est validé par les essais de qualification, il est indispensable d'entreprendre une mesure préventive qui consiste à analyser le comportement dynamique de la pale afin de dégager l'ordre de grandeur des paramètres modaux (fréquences propres et déformées modales) nécessaires pour mettre en évidence d'éventuels problèmes de couplage des fréquences. Ces essais consistent habituellement à imposer forfaitairement un environnement dynamique plus sévère que celui du cas réel.

Les méthodes des essais dynamiques consistent à réaliser un prototype (premier article) et lui faire subir des tests dynamiques, en ambiance laboratoire pour l'identification des zones critiques pouvant provoquer une rupture. Ces méthodes expérimentales sont regroupées sous la nomination de l'Analyse Modale Expérimentale, effectuées par des analyseurs de signaux (FFT) et des logiciels puissants. La nécessité des capteurs de mesure de déplacements vibratoires suffisamment sensibles (accéléromètres de petites tailles, jauges de déformation,...) permettent de réaliser des essais conformes doit être considérée. L'équipement utilisé pour l'analyse modale expérimentale est habituellement constitué d'un ensemble d'instrumentation et de logiciels permettant (i)

l'excitation impulsionnelle de la maquette; (ii) l'acquisition des signaux constituant la réponse dynamique du système; (iii) le traitement, (iv) l'affichage et (v) l'impression des résultats.

Du point de vue économique, l'analyse expérimentale d'une telle structure n'est pas toujours rentable et conduira à une étude longue et laborieuse. La corrélation essais-calculs permet de valider le modèle numérique.

6. Flambage dynamique (local)

Au cours de la rotation de la pale, les faces extrados et intrados sont sollicitées par des charges répétées et variables, engendrant ainsi des contraintes alternées en traction et en compression. La face soumise aux contraintes de compression est susceptible au flambage local. Une fois la zone la plus sollicitée est localisée, une étude pourra être effectuée sur un tronçon de pale. Restant dans cet objectif, les résultats présentés par Attaf [8] peuvent être exploités afin de donner une idée sur l'évolution des fréquences propres en fonction de la charge axiale de compression (variable entre 0- P_{cr}). La *Figure 2* montre cette évolution, illustrée par les courbes $\Gamma^2 = f(\Delta)$ ($\Gamma = f_i/f_{0i}$ et $\Delta = P/P_{cr1}$) pour une plaque dotée de la symétrie miroir et composée de huit plis unidirectionnels de carbone/époxy $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ et un rapport de dimension latérale $\phi = a/b = 2.0$.

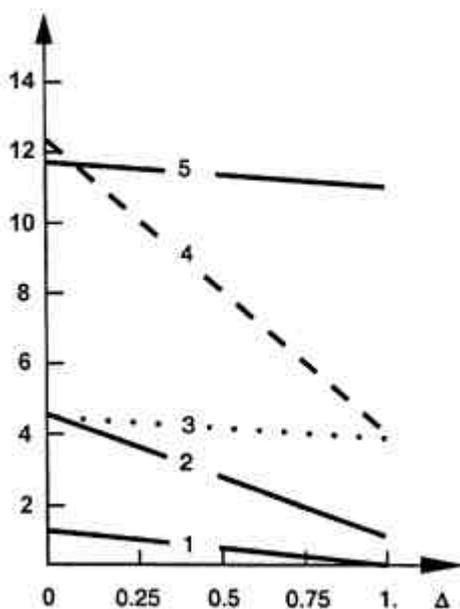


Figure 2 Variation de Γ^2 en fonction du rapport Δ pour une plaque composite

$[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$, sur 4 appuis simples,
 $\phi = a/b = 2.0$.

Mode propre: (—1—) 1er, (—2—) 2ème, (...3...) 3ème, (---4---) 4ème, (—5—) 5ème.

7. Délaminage par flambage

Le phénomène de délaminage est parmi les modes de rupture les plus communs dans le comportement des structures composites. Lors de la fabrication, le mauvais étalement de la résine utilisé entre les plis et/ou les défauts de compactage (porosités) peuvent être les causes principales susceptibles de provoquer ce phénomène. La présence de ce dernier dans une structure composite stratifiée résulte d'une séparation des plis et cause un flambage local qui peut modifier considérablement la rigidité totale de la pale, ce qui mène la charge critique à une dégradation et par conséquent l'endommagement de la structure qui peut ensuite conduire à une rupture prématurée. Cependant, le problème de croissance du délaminage doit faire l'objet d'une étude approfondie. Cette question a attiré, pendant plusieurs années, l'état d'esprit de plusieurs chercheurs. Attaf et ses collaborateurs ont étudié analytiquement le problème de délaminage par flambage et sa croissance dans les plaques composites stratifiées. La *Figure 3* montre l'influence de la longueur et de la position de délaminage sur les charges critiques de flambement d'une plaque en carbone/époxy. Les effets pouvant optimiser la charge critique ont été particulièrement identifiés et analysés.

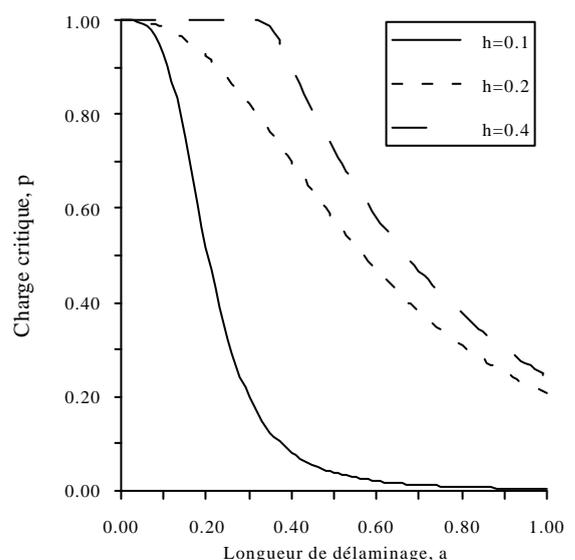


Figure 3 Effets de la position et de la longueur de délaminage sur les charges critiques d'une plaque composite $[0^0 / 90^0 / 0^0]_{10T}$ avec deux bords encastrés.

8. Calcul de la durée de vie (phénomène de fatigue)

Un certain nombre d'échantillons (tronçons) doit être réalisé conformément aux principes de construction de la pale considérée. Ces échantillons seront ensuite testés à un niveau suffisant jusqu'à rupture sous un chargement alterné. Un bon d'essai et des jauges de déformation sont nécessaires pour effectuer de tels essais. Les résultats obtenus par le nombre de points expérimentaux permettront de chiffrer la durée de vie de la pale avec un degré de confiance suffisamment admissible.

9. Equilibrages statique et dynamique des pales

Dans un premier temps, une procédure d'équilibrage statique doit être développée afin de garantir que toutes les pales auront le même moment statique; car chaque pale doit développer la même force centrifuge en rotation ($F_c = \Omega^2 \times M_{ref}$, où Ω est la vitesse de rotation et M_{ref} est le moment statique de référence). L'effet de balourd doit être totalement éliminé. Alternativement, la procédure d'équilibrage dynamique (pale en rotation) doit faire l'objet d'une étude expérimentale en utilisant un banc d'essai spécialement conçu à cet effet. Cet équilibrage garantira que toutes les pales produiront les mêmes efforts en rotation

10. Résultats

Cette phase consiste à rédiger des rapports selon les résultats obtenus, où diverses conclusions seront tirées ainsi que plusieurs solutions seront proposées. Les vérifications nécessaires à la performance structurale de la pale permettront de choisir une bonne conception qui répond aux exigences de masse minimale, coût objectif et meilleure durée de vie.

11. Conclusion

Dans cette étude d'avant-projet, notre contribution consiste à minimiser le plus rapidement possible la crise climatique caractérisée par le réchauffement de la planète

pour les générations futures. Cependant, nous constatons que le développement d'éoliennes de grandes tailles, installées sur mer (offshore), est un choix meilleur pour un pays comme la France qui se caractérise par des zones à forte densité de population.

La solution technologique retenue sera guidée par divers critères, parmi eux on cite: un poids minimum, une économie de main-d'œuvre, une meilleure durée de vie, des matériaux de bonnes caractéristiques, etc...

Cependant, il reste à savoir à quelle vitesse seront développés les points suivants:

- le développement du programme Eole 2005;
- l'établissement d'une activité rentable entre les centres de recherche et l'industrie;
- le développement des procédés de fabrication monobloc (RTM);
- la création des normes spécifiques aux pales d'éoliennes et leurs réparations; et
- la formation des jeunes actifs dans le domaine.

Références

- [1] Desfilhes, P., "Composites – L'automatisation des grandes pièces", *L'usine nouvelle*, No. 2819, Avril 2002, p.48-50.
- [2] Jones, R.M., *Mechanics of composite materials*, Scripta Book Company, Washington, D.C., 1975.
- [3] Berthelot, J.M. *Matériaux composites- Comportement mécanique et analyse des structures*, Masson, Paris, 1992.
- [4] Zhou H.B. et Li G.Y., "Free vibration analysis of sandwich plates with laminated faces using spline finite point method", *Computer & Structures*, Vol.59, No.2, 1996, pp.257-263.
- [5] Maréchal, T., "Pales d'éoliennes", *Composites*, TUT No.38, 4th Quarter 2000, p.14-16.
- [6] Hollaway, L. et Attaf, B., "On the vibration of glass/polyester composite stiffened and unstiffened rectangular plates", Chinese

Society of Aeronautics, 7th Int. Conf. On Composite Materials, Beijing, Oct 1989, p.435-444.

- [7] Attaf, B. et Hollaway L. "Vibrational analyses of glass reinforced Polyester composite plates reinforced by a minimum mass central stiffener", *Composites*, Vol.21, Sept.1990, p. 425-430.
- [8] Attaf, B. "Effects of laminate stacking sequence on the free vibration of carbon/epoxy composite plates subjected to in-plane loads", *La Recherche Aérospatiale*, 1996 (2), p.149-153.